

ANNÉE 1933

THÈSE **558** N^o

POUR

LE DOCTORAT EN MÉDECINE

(DIPLOME D'ÉTAT)

PAR

Olivier SALAÜN

Licencié es-Sciences

Né à Paris, le 11 Juillet 1905

Les Cellules Photo-Voltaïques
et leur
Application à la mesure des Rayons X

Président de Thèse : M. le Professeur Strohl

IMPRIMERIE DE PERSAN-BEAUMONT

80, Avenue Wilson, 80

PERSAN (S.-et-O.)

FRANCE

835

Les Cellules Photo-Voltaïques
et leur
Application à la mesure des Rayons X



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA40152024_0001

ANNÉE 1933

THÈSE

N°

POUR

LE DOCTORAT EN MÉDECINE

(DIPLOME D'ÉTAT)

PAR

Olivier SALAÜN

Licencié es-Sciences

Né à Paris, le 11 Juillet 1905

Les Cellules Photo-Voltaïques
et leur
Application à la mesure des Rayons X

Président de Thèse : M. le Professeur Strohl

IMPRIMERIE DE PERSAN-BEAUMONT

80, Avenue Wilson, 80

PERSAN (S.-et-O.)

I. — PROFESSEURS

	MM.
Anatomie	ROUVIERE.
Anatomie médico-chirurgicale et chirurgie expérimentale....	PROUST.
Physiologie	BINET.
Physique médicale	STROHL.
Chimie médicale	DESGREZ.
Bactériologie	DEBRE.
Parasitologie et histoire naturelle médicale.....	BLUMPT.
Pathologie et thérapeutique générales.....	BAUDOUIN.
Pathologie médicale	CLERC.
Pathologie chirurgicale	CHEVASSU.
Anatomie pathologique	ROUSSY.
Histologie	CHAMPY.
Pharmacologie et matière médicale.....	TIFFENEAU.
Thérapeutique	LOEPER.
Hygiène et médecine préventive.....	TANON.
Médecine légale	BARTHAZARD.
Histoire de la médecine et de la chirurgie.....	LAIGNEL-LAVASTI
Pathologie expérimentale et comparée	FIESSINGER.
Hydrologie thérapeutique et climatologie.....	Maurice VILLARET
Clinique médicale	CARNOT.
	BEZANÇON.
	ACHARD.
	Marcel LABBE.
Hygiène et clinique de la première enfance.....	LEREBOUILLER.
Clinique des maladies des enfants.....	NOBECOURT.
Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale.	H. CLAUDE.
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques.....	GOUGEROT.
Clinique des maladies du système nerveux.....	GUILLAIN.
Clinique des maladies infectieuses.....	LEMIERRE.
	LENORMANT.
Clinique chirurgicale	CUNEO.
	GREGOIRE.
	GOSSET.
Clinique ophtalmologique	TERRIEN.
Clinique urologique	MARION.
	COUVELAIRE.
Clinique d'accouchements	BRINDEAU.
	JEANNIN.
Clinique gynécologique	J.-L. FAURE.
Clinique chirurgicale infantile et orthopédie.....	OMBREDANNE.
Clinique thérapeutique médicale	RATHERY.
Clinique oto-rhino-laryngologique	LEMAITRE.
Clinique thérapeutique chirurgicale	Pierre DUVAL.
Clinique propédeutique	SERGENT.
Clinique de la Tuberculose	Léon BERNARD.
Clinique chirurgicale orthopédique de l'adulte.....	MATHIEU.
Professeurs sans chaire	HOVELACQUE.
	MULON.
	VERNE.

II. — AGREGES EN EXERCICE

M.

JOUANINE Neurologie et Psychiatrie.
 ERTIN Pathologie médicale.
 ARD Henri. Pathologie médicale.
 CO Pathologie chirurgicale.
 LE Pathologie médicale.
 QUET Pharmacologie.
 ENAT Pathologie chirurgicale.
 HALA Pathologie médicale.
 BROL Pathologie médicale.
 ILLEY-BERT.. Physiologie.
 VALLIER , Pathologie médicale.
 NON Physique.
 ZELOT ... Pathologie médicale.
 LE Obstétrique.
 Urologie.
 TINEL Bactériologie.
 ELLIER ... Pathologie chirurgicale.
 GAUDART D'ALLAINES... Pathologie chirurgicale.
 OUD Histologie.
 PHEN Oto-rhino-laryngologie.
 VIER Pathologie médicale.
 ARD Pharmacologie.
 UENIN ... Anatomie pathologique.

MM.

JOANNON Hygiène.
 LABBE (Henri). Chimie biologique.
 LAROCHE (Guy). Pathologie médicale.
 LEVEUF Pathologie chirurgicale.
 LEVY-VALENSI Neuro-psychiatrie.
 LIAN Pathologie médicale.
 MONDOR Pathologie chirurgicale.
 MOREAU Pathologie médicale.
 MOULONGUET Pathologie chirurgicale.
 MOÛRE Pathologie chirurgicale.
 OBERLING ... Anatomie pathologique.
 OLIVIER Anatomie.
 PIEDELIEVRE Médecine légale.
 PORTES Obstétrique.
 QUENU Pathologie chirurgicale.
 RICHET Physiologie.
 SANNIE Chimie biologique.
 SEZARY Dermatologie et syphiligraphie.
 TROISIER Pathologie expérimentale et comparée.
 VALLERY - RA.
 DOT (Pasteur) Pathologie médicale.
 VAUDESCAL .. Obstétrique.
 VELTER Ophtalmologie.
 VIGNES Obstétrique.

III. — AGREGES RAPPELES A L'EXERCICE

pour le service des examens

M.

UEUX Obstétrique.
 OUX Anatomie pathologique.

MM.

NEVEU-LEMAIRE Parasitologie.
 RETTERER .. Histologie.
 ZIMMERN Physique.

V. — AGREGES CHARGES DE COURS DE CLINIQUE ANNEXE

à titre permanent

MM.

ABRAMI	Clinique médicale.
CHIRAY	Clinique médicale.
DUVOIR	Clinique médicale.
BASSET	Clinique chirurgicale.
HEITZ-BOYER	Clinique chirurgicale.

MM.

MOCQUOT ...	Clinique chirurgicale.
SCHWARTZ ...	Clinique chirurgicale.
LE LORIER ...	Clinique obstétricale.
LEVY-SOLAL	Clinique obstétricale.
METZGER	Clinique obstétricale.
GUENIOT	Clinique obstétricale.

V. — CHARGES DE COURS

MM.

FREY	Stomatologie.
CHAILLEY-BERT, agrégé	Education physique.
LEDOUX-LEBARD	Radiologie clinique.
WEIL-HALLE	Puériculture.

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A MON PRÉSIDENT DE THÈSE

MONSIEUR LE PROFESSEUR STROHL

Professeur de Physique médicale

*Hommage respectueux
en remerciement de l'accueil qu'il
nous a réservé dans son laboratoire.*

A MONSIEUR LE PROFESSEUR AGRÉGÉ DOGNON

qui a inspiré ce travail, en reconnaissance et en remerciement de l'aide qu'il nous a apporté.

Il nous est agréable de remercier ici ceux qui ont guidé nos études médicales : le Docteur Delherm, chef du Service Central de Radiologie de l'Hôpital de la Pitié, dont nous fûmes plus de trois ans l'externe ; les Docteurs Thoyer-Rozat et Morel Kahn, électro-radiologistes des hôpitaux, pour l'aide qu'ils nous ont toujours apportée.

Le Docteur Belot, chef du Service Central de Radiologie de l'Hôpital Saint-Louis, qui a bien voulu nous autoriser à faire quelques mesures dans son service ; le Docteur Turchini, chef des travaux de physique à la Faculté de Médecine. Ceux qui furent nos maîtres dans les hôpitaux. Le regretté professeur Widal, le professeur Hartmann, le docteur Louis Ramon, le professeur agrégé Schwartz.

Nous devons en outre des remerciements tout particuliers au Professeur agrégé Sannié, Directeur des Services de l'Identité judiciaire, pour les documents qu'il nous a fournis en vue de ce travail.

INTRODUCTION

Les cellules photo-voltaïques se présentent sous la forme de petits disques métalliques recouverts d'un enduit de faible épaisseur ; si l'on éclaire ces éléments, il se produit une différence de potentiel entre la face supérieure (côté enduit) et la face inférieure (côté métal) et si l'on relie les deux faces de la cellule par un circuit extérieur, la cellule débite un courant dont l'intensité peut être assez élevée, de l'ordre même du milliampère, pour un rayonnement intense.

On a pensé à utiliser cet élément pour la mesure de l'intensité du rayonnement, mesure qui était faite jusqu'à présent : soit par des bolomètres, soit à l'aide de cellules photo-électriques, soit par des procédés chimiques variables ; chacun de ces moyens présente un assez grand nombre d'inconvénients : le bolomètre est un instrument d'un réglage délicat, qui doit être préservé contre tout apport de chaleur parasite.

Les cellules photo-électriques à résistance variable nécessitent l'adjonction d'un générateur, pile ou accumulateur.

Les procédés chimiques sont sélectifs et d'un manie-ment compliqué.

La cellule photo-voltaïque présenterait sur tous ces

INTRODUCTION

procédés l'avantage d'une grande robustesse et d'une grande sensibilité; elle transforme directement, sans source auxiliaire, l'énergie rayonnante en courant, et la mesure se fait par simple lecture sur un instrument gradué.

Nous avons cherché à voir si son emploi pouvait être généralisé aux mesures radiologiques. Dans les trois premiers chapitres, nous avons étudié la nature même de la cellule ; dans les chapitres suivants, l'étude a porté sur l'effet photo-voltaïque ; un court chapitre énumère enfin les applications possibles dans le domaine des rayons X.

CHAPITRE PREMIER

STRUCTURE D'UN ELEMENT PHOTO-VOLTAIQUE

Un élément photo-voltaïque peut être considéré, en première approximation, comme identique à un élément redresseur dans lequel le rayonnement (lumière, rayons X) peut pénétrer.

Nous étudierons d'une manière générale la constitution d'un élément redresseur et nous verrons ensuite les modifications à y apporter pour le transformer en cellules photo-voltaïques.

Rappelons brièvement ce que l'on entend du point de vue théorique par corps conducteurs, corps isolants :

Le conducteur est un corps qui contient des particules électrisées, libres de se mouvoir. Dans un métal, par exemple, chaque molécule perd un petit nombre d'électrons, vraisemblablement ceux que l'on appelle électrons de valence ; ceux-ci, au lieu d'avoir une trajectoire circonscrite au noyau, se comportent comme les molécules d'un gaz et ont un parcours plus ou moins complexe à l'intérieur du métal. On peut même évaluer leur libre parcours moyen, libre parcours conditionné par la différence de potentiel appliquée, par les chocs qu'ils subissent entre eux, par les chocs qu'ils subissent sur les noyaux positifs restés en place, conditionnés enfin par l'agitation thermique générale du métal.

Un tel conducteur est électriquement neutre ; le nombre des électrons libres y équilibre celui des noyaux positifs.

Si, à l'aide d'une machine statique quelconque on produit un nouvel apport d'électrons, ceux-ci vont se répandre à travers le métal qui prendra une charge négative.

La conductibilité dépend du nombre des particules électrisées :

Dans un électrolyte les ions libres ;

Dans un métal les électrons libres.

Elle dépend en outre de leur libre parcours moyen.

On a essayé de formuler mathématiquement les relations entre ces différents facteurs. La théorie de la conductibilité des métaux a été faite par Lorentz (1). Plus récemment, en tenant compte des données modernes, elle a été transformée par différents auteurs ; on la trouvera très complètement exposée dans *Les statistiques quantiques* de L. Brillouin, chapitres VII et VIII. Nous dirons seulement que l'on est conduit à considérer les électrons libres dans les métaux comme formant un gaz complètement dégénéré, c'est-à-dire comprimé à l'extrême et très loin du gaz parfait ; ultérieurement on fait intervenir la mécanique ondulatoire de L. de Bröglie.

La conductibilité dans les électrolytes a fait l'objet de quantité de travaux, tous classiques, sur lesquels il nous paraît inutile de nous étendre.

Contrairement au conducteur, un corps isolant ne contient pas de particules électrisées libres. Les électrons apportés par une machine statique restent à la place où on les a déposés ; si même on en suppose un apport continu, ils s'accumuleront au même endroit, formant rapidement une charge négative considérable, et empêchant par là même la venue de nouveaux électrons.

Entre le parfait conducteur et le parfait isolant, tous les deux purement théoriques, nous avons tous les intermédiaires : semi-conducteurs, semi-isolants.

Un élément redresseur doit être, à première approximation, considéré comme formé de deux électrodes de conductibilité très différente, séparées par une couche de

(1) LORENTZ, *Theorie of Electrons*, 1901.

très faible épaisseur d'un corps quasi-isolant. Nous en donnerons la théorie dans le chapitre suivant.

De nombreux modèles peuvent théoriquement être imaginés.

Citons celui de Pelabon (1) : deux cylindres reposant l'un sur l'autre, séparés par une fine couche de lycopode. Le cylindre inférieur est sur un plan fixe ; le cylindre supérieur réalise par sa pression variable suivant l'intensité du courant, ce que Pelabon appelle un mauvais contact.

Citons encore l'élément au silicium étudié par Audubert (2) : par un procédé quelconque, électrolyse ou chauffage, il oxyde une couche de silicium, puis sur ce silicium oxydé il place une électrode en charbon. L'ensemble silicium, silice, charbon, réalise les deux conducteurs de conductibilité différente séparés par un isolant presque parfait.

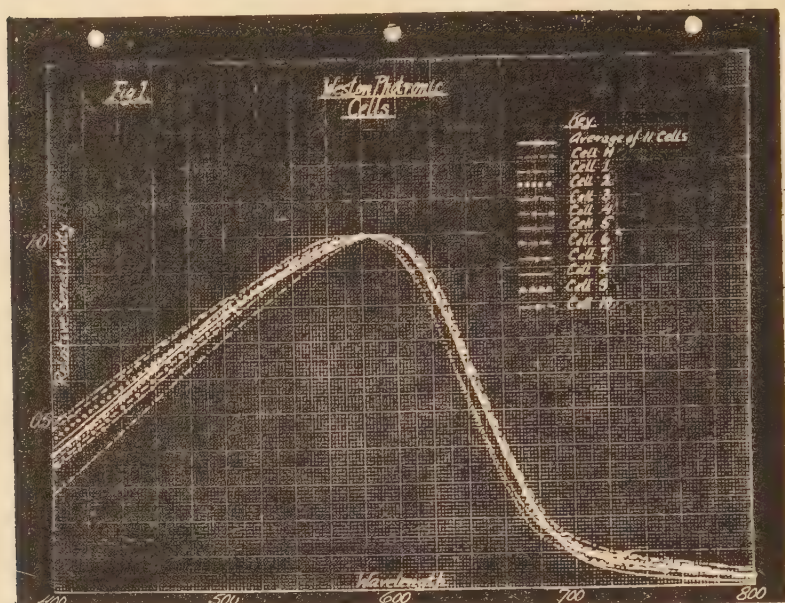
En fait les redresseurs les plus étudiés sont ceux à l'oxyde de cuivre, dont un grand nombre de chercheurs ont approfondi tant la constitution que les propriétés ; ceux au sélénium et, d'une manière générale, ceux formés à l'aide d'oxyde de métaux alcalins. Nous avons eu entre les mains une cellule à oxyde de cuivre de P. Auger, d'autres cellules dont la composition n'a pu nous être précisée exactement : cellules de Weston vraisemblablement au sélénium, cellules de la S. A. F. de Nuremberg au sélénium, enfin les fragments de redresseur également au sélénium. Ces éléments contiendraient en outre du tellure. Tous se présentent sous la forme d'un disque métallique recouvert d'un enduit de très faible épaisseur.

(1) PELABON, C. R. 188, p. 383, 1929.

(2) AUDUBERT, C. R. 187, p. 972, 1928.

LES CELLULES PHOTO-VOLTAÏQUES

Nous résumons ici les travaux faits sur la constitution de la cellule à oxyde de cuivre dont la composition est très bien connue et correspond au schéma indiqué ci-dessous.



Elle est faite en oxydant une plaque de cuivre généralement par chauffage à l'air ou en présence d'oxygène. On enlève ensuite la couche d'oxyde cuivrique noire jusqu'à ce que la surface ait une teinte rouge sang. On décape complètement la face opposée pour mettre le cuivre à nu. Il ne reste plus qu'à introduire cette lame entre deux électrodes pour avoir un élément redresseur.

Pelabon (1) a étudié dans le détail la couche d'oxyde, nous suivrons pas à pas son exposé :

La lame a été sectionnée suivant un plan très incliné, puis examinée à l'aide du microscope de Le Chatellier.

(1) PELABON, C. R. 190, p. 630, 1930.

On rencontre de la surface à la profondeur :

1° Un corps gris en poudre fine formé d'oxyde cuivrique (CuO) assez conducteur ;

2° Une phase verte légèrement hétérogène qui résulte de la solidification après fusion du mélange $\text{CuO-Cu}_2\text{O}$. C'est le mixte déjà obtenu par Debray-Juanis lors de l'étude de la dissociation de l'oxyde cuivrique. La composition en est connue lorsque la température de préparation de la pastille est connue. En effet, avec l'oxygène de l'air, ce mélange constitue un système bi-variant. Dans les conditions de l'expérience, il semble que la composition moyenne est voisine de $2 \text{ CuO } \text{Cu}_2\text{O}$. Elle n'est d'ailleurs pas uniforme, plus on approche du cuivre, plus les particules de CuO sont nombreuses et volumineuses et il finit par n'y avoir que du CuO conducteur ;

3° Au-dessous du plan conducteur CuO , on trouve une couche verte très homogène formée d'oxydure pur (la teinte verte est due à la lumière réfractée, car l'oxydure est rouge par réflexion).

4° On pénètre dans le cuivre en rencontrant tout d'abord le mélange eutectique très conducteur :

Cu , 96,5 % Cu_2O , 3,5 %

On expliquerait la répartition de ces différentes couches en admettant que, à la température de la préparation, l'oxyde cuivrique n'est pas dissous mais en suspension dans Cu_2O liquide ; la couche d'oxydure serait due à une action capillaire.

De toute façon nous avons ici le redresseur type décrit plus haut :

Oxyde cuivrique (mauvais conducteur) ;

Oxydure (isolant) ;

Eutectique granulaire (très conducteur).

On peut également le considérer comme formé de :

Electrode supérieure (conductrice) ;

Cu_2O (quasi-isolant) ;

CuO (semi-conducteur).

En présence de ces résultats, un grand nombre d'auteurs ont cherché à analyser séparément les propriétés de chacune des couches et à réaliser en quelque sorte un réducteur synthétique.

Dubar (1) produit séparément : un mélange d'oxyde cuivreux et d'oxyde cuivrique semi-conducteur, une pastille d'oxyde cuivreux pur semi-isolant ; il vérifie leur résistance et obtient des chiffres confirmant les résultats plus haut cités. Il montre également (2), et ceci nous intéresse plus, que le Cu^2O se trouve en très petite quantité dans la couche isolante, sans qu'il puisse préciser sa nature colloïdale ou cristallographique.

Pelabon (3) essaie de réaliser un redresseur synthétique : partant d'une pastille chimiquement pure d'oxyde cuivrique, il lui fait subir un traitement thermique approprié, de manière à obtenir la semi-conductibilité désirée ; il remplace la lame isolante d'oxydure par une solution de gomme ou par du collodion ; il prend enfin une électrode conductrice de cuivre ; en superposant ces trois éléments dans l'ordre indiqué, il obtient un assez bon redresseur.

Il lui est alors venu à l'idée d'étudier différents semi-conducteurs et de construire ainsi différents modèles de redresseurs.

Il a fallu distinguer entre les corps employés ; en nous reportant aux définitions données plus haut nous voyons que l'on peut définir trois catégories de semi-conducteurs :

1° Ceux où les particules électrisées libres sont des électrons (PbS par exemple) ;

2° Ceux où les particules électrisées libres sont des ions (sulfure d'argent) ;

3° Ceux qui sont mixtes (oxyde de cuivre).

Il résulte des expériences de Pelabon que les semi-conducteurs du premier groupe ne donnent pas lieu à des phénomènes de rectification.

(1) DUBAR, C. R. 192, p. 341, 1931.

(2) DUBAR, C. R. 194, p. 130, 1932.

(3) PEDABON, C. R. 191, p. 404, 1930.

Il semble bien que la constitution physique interne des autres cellules photo-voltaïques que nous avons pu avoir entre les mains peut être considérée comme analogue à celle des cellules à oxyde de cuivre.

La couche semi-conductrice se trouve constituée par une variété allotropique du sélénium, peut-être mélangée à d'autres corps : tellure, chrome. Il faut remarquer que la théorie photo-électrique de ce corps a été établie par beaucoup d'auteurs en se fondant sur une composition analogue à celle étudiée plus haut pour les redresseurs : Riess (1) admet que, dans les éléments classiques à résistance variable sous l'action de la lumière, le selenium se présente sous deux formes allotropiques de propriétés physiques distinctes et particulièrement de conductibilité électrique très différente. Brown (2) fonde également une théorie du même effet en distinguant trois formes physiques différentes. D'autres considérations peuvent faire choisir le selenium comme semi-conducteur. L'une des principales tient à ce que l'effet photo-voltaïque sous l'action de la lumière, a été pour la première fois découvert dans ce corps par Adam en 1875 (3).

Ces cellules sont construites en fondant une couche mince de sélénium sur une plaque de fer ; par chauffage convenable on transforme ce sélénium en modification grise, cristalline, métallique, réalisant la couche semi-conductrice. Nous n'avons pas d'analyse faite aussi finement pour ces éléments que pour ceux à l'oxyde de cuivre, mais il est admis par tous les auteurs qu'il se forme une lame quasi-isolante très fine à la surface du semi-conducteur. Le conducteur parfait sera constitué par l'électrode antérieure.

Un redresseur conçu comme ceux décrits ci-dessus ne pourra être utilisé comme cellule photo-voltaïque que s'il se laisse traverser par le rayonnement. Mais il faut d'autre part pouvoir capter le courant fourni par la cellule, c'est-

(1) RIESS, *Physick*, 9, 164, 228, 569, 1928.

(2) BROWN, *Physical*, 33, 1, 403, 1912.

(3) ADAM, *Proc. Royal Soc.*, 23, 535, 1875.

à-dire placer sur chacune de ses faces une électrode formant les bornes du circuit extérieur. Cela est facilement réalisable du côté métal ; de l'autre côté, cette électrode absorbera fatalement de la lumière. On pourrait envisager un disque circulaire qui prendrait le courant sur les bords de la couche semi-conductrice mais alors la densité électrique serait inégale au centre et à la circonférence. On a envisagé des électrodes en forme de grille (Auger, Dubar, Bergmann), mais les mêmes inconvénients s'y retrouvent quoique moins accentués.

En fait on a été conduit, dans tous ces éléments, à prendre comme électrode antérieure une mince couche métallique, transparente à la lumière, obtenue par pulvérisation cathodique. On est naturellement obligé d'employer des métaux précieux, sinon une oxydation rapide est à craindre ; on utilise généralement de l'or ou de l'argent ; il est à remarquer que ce choix lui-même n'est pas indifférent : des mesures faites par P. Auger (2) il résulte que deux cellules identiques recouvertes d'une pellicule d'or ou d'argent n'ont pas la même courbe de sensibilité à la lumière ; il ne s'agit nullement d'une modification intrinsèque due à la nature du métal, mais uniquement d'un coefficient d'absorption différent de la couche antérieure ; si on mesure les coefficients d'absorption à la lumière pour deux surfaces semblables d'or et d'argent, on remarquera qu'ils sont dans le même rapport que les courbes de sensibilité ; celles-ci sont seulement décalées.

Il en est tout autrement lorsqu'il s'agit de rayons X ; les coefficients d'absorption sont négligeables sous de faibles épaisseurs et il n'est nullement nécessaire de recourir à une pulvérisation cathodique pour obtenir l'électrode supérieure. Ceci est si vrai que nous avons pu utiliser pour la mesure du rayonnement X des éléments redresseurs recouverts d'une couche de plomb absorbant complètement la lumière et que les résultats ont été identiques à ceux obtenus à l'aide d'une cellule photo-voltaïque recouverte d'une couche conductrice transparente.

(2) P. AUGER, C. R. 193, p. 319, 1931.

CHAPITRE II

RESISTANCE INTERIEURE DES ELEMENTS PHOTO-VOLTAIQUES

Avant d'arriver à l'étude de l'effet photo-voltaïque, il nous paraît intéressant de connaître les caractéristiques à l'obscurité des cellules photo-voltaïques, ce qui nous conduit d'ailleurs tout naturellement à une théorie complète de l'effet.

Un grand nombre de mesures ont été faites sur ce sujet. En effet, ces cellules sont d'abord rectifiantes et l'étude des redresseurs est venue en premier lieu.

Les résultats donnés par les différents auteurs ont une allure générale assez semblable ; mais différent, parfois sensiblement, dans leurs détails, ce qui tient évidemment au fait que les cellules étudiées sont loin d'être identiques comme construction.

On leur trouve une résistance intérieure non ohmique et dont la mesure ne peut être faite par les méthodes habituelles. On en a toutefois une idée très suffisante en considérant cette résistance comme le quotient de la différence de potentiel appliquée aux bornes, par l'intensité du courant débité. L'étude de la conductibilité se ramènera donc à l'étude de la courbe caractéristique : intensité en fonction de la tension.

Dans les éléments au sélénium que nous avons eus entre les mains, cette étude est elle-même délicate ; en effet, si l'on applique une différence de potentiel connue

LES CELLULES PHOTO-VOLTAÏQUES

aux bornes, la résistance, mesurée par le courant passant dans le circuit extérieur, varie avec le temps dans des proportions considérables ; toutefois, ceci n'a lieu que si la tension est placée dans le sens où l'élément est redresseur, c'est-à-dire où la résistance intérieure est très élevée. Dans l'autre sens le même phénomène est considérablement atténué.

On s'en rend facilement compte en regardant les tableaux 1 et 2 et les courbes correspondantes faites pour

TABLEAU I

Cellule S. A. L. Nuremberg

Différence de potentiel 4 volts. Intensité en fonction du temps

Temps	Intensité Milliampères	Temps	Intensité Milliampères	Temps	Intensité Milliampères
0	3	1'7"	2,2	4'	1,7
15"	2,5	1'40"	2,1	6'30"	1,2
40"	2,3	2'25"	2	15'	1,7

TABLEAU II

Cellule S. A. L. Nuremberg

Différence de potentiel 12 volts. Intensité en fonction du temps.

Temps	Intensité Milliampères	Temps	Intensité Milliampères	Temps	Intensité Milliampères
0	40	2'15"	27,5	16'	20
26"	35	4'	5		
1'20"	30	7'30"	22,5		

une cellule S. A. F. dans le sens de la résistance maximum, c'est-à-dire le pôle positif relié à l'électrode supérieure. Sous 4 volts l'intensité tombe au tiers de sa valeur primitive en 2 minutes 25 secondes, puis décroît ensuite très lentement, tendant vers une valeur limite qui semble

ET LEUR APPLICATION A LA MESURE DES RAYONS X

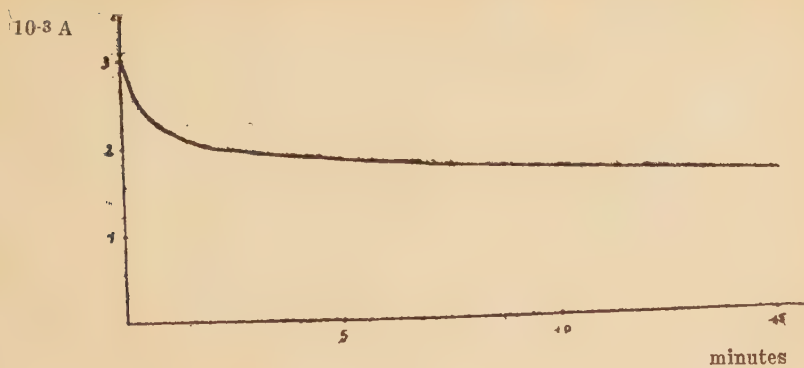


Fig. 1
Courbe 1

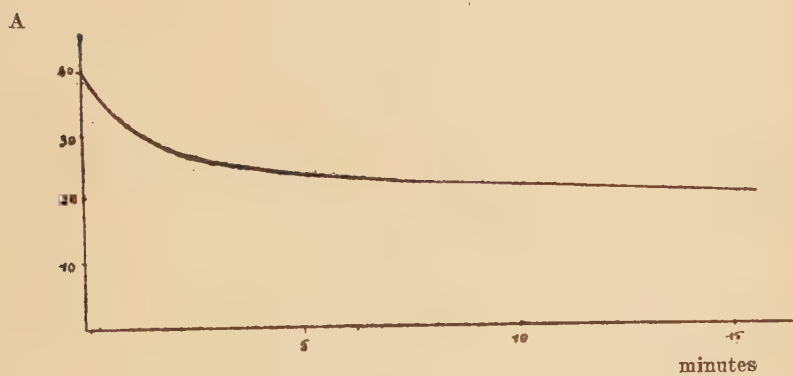


Fig. 2
Courbe 2

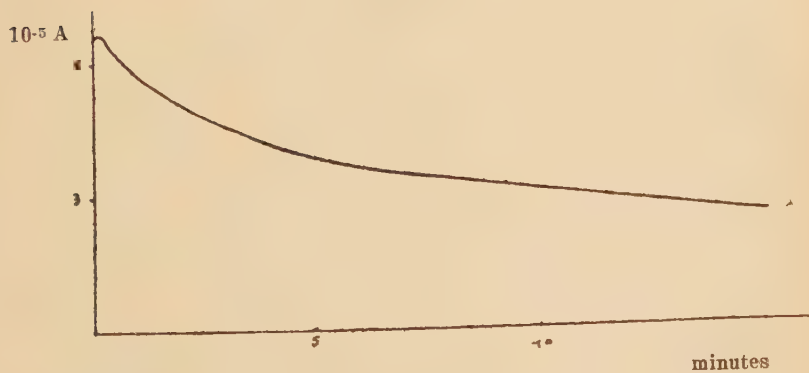


Fig. 3
Courbe 3

devoir être atteinte au bout d'un temps très long. Sous une différence de potentiel plus élevée le résultat est encore plus net et ce n'est qu'au bout de plusieurs heures qu'on peut espérer avoir atteint une position presque stable ; on perçoit même alors de légères variations de très faible amplitude et de sens indéterminé.

Le tableau 3 et la courbe 3 ont été faits à l'aide de deux éléments redresseurs montés en opposition ; l'allure générale est la même, mais il faut noter une très légère croissance du courant quelques instants après l'établissement de la tension.

TABLEAU III

Deux éléments redresseurs en opposition

Différence de potentiel 12 volts. Intensité en fonction du temps.

Temps	Intensité Milli- ampères	Temps	Intensité Milli- ampères	Temps	Intensité Milli- ampères
0	6,5	40"	6	3 70"	4,5
7"	6,6	1'20"	5,5	4'45"	4
15"	6,5	2'10"	5	8'15"	3,5
				15'	3,1

Si après avoir fait passer le courant un certain temps, on laisse la cellule revenir à son état primitif, en faisant de temps à autre une mesure de l'intensité, on constate que le retour aux conditions initiales ne se fait que très lentement ; dans le cas de la courbe 1, l'intensité tombée de 3 milliampères à 1,7 milliampère remonte à 2,3 milliampères en 3 minutes, à 2,7 milliampères en 10 minutes et à 3 milliampères en un quart d'heure. Nous avons essayé d'accélérer le retour aux conditions initiales en changeant le sens du courant : le voltage est appliqué un quart d'heure dans le sens de la résistance la plus élevée, puis on inverse brutalement la différence de potentiel durant quelques minutes ; on note ensuite, au bout de 5, 10 minutes, la valeur de l'intensité débitée dans le sens primitif. Il ne

nous a pas paru que le retour aux conditions initiales soit plus rapide dans ce cas.

Nous avons également essayé de mettre en évidence une force contre-électromotrice en coupant le circuit pile-cellule et en établissant rapidement un circuit cellule-galvanomètre, ceci en un cinquième de seconde environ ; mais nous n'avons pas eu le moindre déplacement du spot.

Il nous semble que ces phénomènes doivent avoir une origine analogue à celle des phénomènes d'hystérésis, déjà étudiés sur le sélénium par plusieurs auteurs, plutôt qu'à la présence de forces contre-électromotrices de polarisation.

Lorsque la tension est appliquée de façon que le pôle négatif soit relié à la face antérieure de la cellule, les variations d'intensité sont excessivement faibles en fonction du temps :

Cellule SAF de Nuremberg

Temps (secondes).....	0	90	180	600	900
Intensité (ampères)...	2,2	1,1	1,05	1,05	1,05

Toutes ces mesures ont été faites avec des tensions considérables par rapport aux fem produites par effet photo-voltaïque. Il était intéressant de voir ce que deviennent les courbes données plus haut lorsque les cellules sont soumises à une différence de potentiel très faible.

Un réducteur de potentiel et un galvanomètre nous ont permis d'obtenir et de mesurer des voltages de l'ordre du millivolt. On trouve alors une grande constance de l'intensité en fonction du temps.

Dans le cas des cellules à oxyde de cuivre, le phénomène décrit ci-dessus ne se produit pas.

Nous arrivons maintenant au problème que nous nous étions posé au début de ce chapitre : variation de l'intensité (de la résistance), en fonction du voltage appliqué aux bornes, ceci lorsque la cellule est plongée dans l'obscurité.

Nous avons établi deux séries de courbes :

1° La tension aux bornes est de l'ordre de quelques volts ;

2° La tension aux bornes est de l'ordre de quelques millivolts.

Dans la première série, nous devons mettre à part le cas où la différence de potentiel est appliquée dans le sens rectifiant puisqu'alors tous les points de notre courbe se déplacent avec le temps. Nous avons pris pour instant de la mesure, l'instant initial et nous avons obtenu les chiffres ci-dessous :

1° Le courant entre par l'électrode oxyde, le pôle positif de la pile est relié à la couche conductrice supérieure de la cellule :

V (volts)	2	4	8	12
I (milliampères) ..	0,6	3	12	40

2° Le pôle positif de la pile est relié à l'électrode métallique :

V (volts)	2	4	6	8	12
I (ampères)	0,4	1	2	4	15

3° Trois mesures ont également été faites en mettant en opposition deux cellules identiques :

V (volts)	4	8	12
I (milliampères)	0,3	1,8	5,5

Les courbes correspondantes sont représentées sur la figure 4, l'échelle est différente pour les deux courbes afin d'en obtenir la superposition.

La deuxième série est représentée par les croix.

Elles ont une allure générale qui rappelle assez bien la parabole, surtout lorsque l'on est loin de l'origine. Ce fait est à retenir car il se retrouve pour la plupart des redresseurs. En particulier les courbes faites sur les redresseurs à oxyde de cuivre ont exactement la même allure ; quelques mesures sur notre cellule à CuO nous ont donné une progression analogue.

Il nous paraît intéressant de reproduire ici une courte

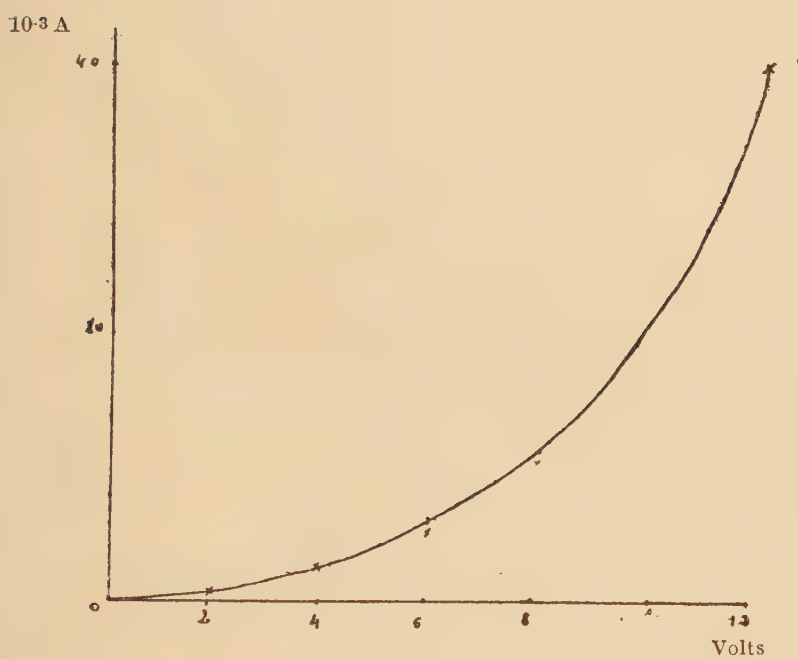


Fig. 4

Courbe 4

théorie due à Audubert et Quentin (1) pour expliquer cette allure parabolique.

Les expériences d'Audubert ont porté sur les redresseurs à silicium décrit au chapitre précédent : une électrode de silicium, une de charbon, séparées par une mince couche de silice. Le silicium est moins conducteur que le carbone, le courant passe plus facilement lorsqu'il est relié au pôle positif.

Si ces deux conducteurs étaient au contact, la loi de déplacement serait purement et simplement la loi d'ohm. Si le flux électronique se déplaçait régulièrement d'une électrode à l'autre, le raisonnement conduirait à une courbe analogue à la première portion de la caractéristique des lampes triodes. En fait il y a une pellicule lacunaire, semi-isolante, de silice entre les deux électrodes et le phénomène est différent ; il y a formation d'ions, qui par suite de la présence de la lame isolante, s'accumulent entre les électrodes. Les lois qui doivent s'appliquer sont celles qui tiennent compte de la présence de charge électrique dans le champ. C'est donc la formule de Poisson qui intervient ici :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -4\pi\rho$$

où ρ représente la densité électrique.

Le courant i qui traverse les électrodes sera proportionnel, d'une part à cette densité des ions en mouvement, d'autre part à la vitesse v de ces ions.

$$i = \rho v$$

Mais la vitesse peut ici, au bout d'un temps très court, être considérée comme directement proportionnelle au champ.

$$v = k \frac{dV}{dx}$$

d'où :

$$\frac{dV}{dx} \frac{d^2V}{dx^2} = -4\pi k i$$

(1) AUDUBERT et QUENTIN, C. R. 187, p. 972, 1926.

que l'on doit intégrer dans l'espace situé entre les deux électrodes :

x variant de 0 à l ,
 l distance des électrodes.

Il s'agit d'une intégration classique et simple qui donne, calcul fait :

$$V = \left(\frac{32 \pi l^3}{9 k} i \right)^{1/2}$$

en supposant $\frac{dV}{dx} = 0$ pour $V = 0$

d'où :

$$i = \frac{9 k}{32 \pi l^3} V^2 \quad (1)$$

On retrouve bien une loi de proportionnalité de l'intensité au carré de la différence de potentiel ; ce raisonnement va nous permettre de pénétrer beaucoup plus avant dans l'étude de la structure de la cellule.

L'équation (1) peut en effet s'écrire :

$$i = k A v^2$$

A étant un coefficient quelconque ;

K a par contre une valeur précise et bien déterminée, l'équation :

$$v = k \frac{dV}{dx}$$

nous montre que K n'est autre, à un facteur près, que la mobilité des corpuscules électriques.

La formation de ces ions n'a lieu que d'un seul côté de la membrane isolante qu'ils ne traversent que difficilement. Selon qu'ils sont positifs ou négatifs, leur mobilité est très différente et l'on a deux courants d'intensités :

$$\begin{aligned} i &= k A v^2 \\ i' &= k' A v^2 \end{aligned}$$

dont le rapport est égal au rapport des mobilités.

Bien d'autres calculs ont été faits, bien d'autres théories ont été construites en vue d'expliquer cette loi du carré ; nous n'avons exposé ici que la plus simple. Il faut toutefois remarquer qu'elle suppose une conductibilité par grosses molécules, par ions, et non uniquement par électrons, ce qui confirme la classification donnée par Pelabon pour les corps semi-conducteurs. On pourrait chercher l'origine de ces ions. La théorie généralement admise les fait se former à partir du gaz inclus dans les corps en présence.

En fait les chiffres reproduits plus haut ne sont vrais que pour des différences de potentiel suffisamment élevées ; dès que l'on descend au millivolt, les résultats sont entièrement différents. La courbe ne se présente pas au niveau de l'origine comme on pourrait l'induire de la figure 4. Elle n'est pas tangente à l'axe des X, mais le coupe très obliquement ; en outre, il n'y a pas dans cette région de variation de l'intensité en fonction du temps et l'effet rectifiant y est beaucoup moins marqué ; en fait on approche des voltages correspondant aux f.e.m. obtenus par l'action photo-voltaïque des rayons X. La caractéristique de la cellule est alors une droite ainsi qu'il en résulte du tableau 4 et de la courbe 5. Ces chiffres ont été obtenus à l'aide d'une pile de 4 volts fermés sur une résistance de 20.000 ohms ; la cellule, montée en série avec un galvanomètre de 10 ohms, était branchée sur une partie de cette résistance ; l'ensemble formait réducteur de potentiel. La courbe peut pratiquement être assimilée à une droite et l'on peut considérer que dans cette région la loi est sensiblement ohmique.

TABLEAU IV

Tension 10 ⁻⁴ V	Intensité 10 ⁻⁷ A	Tension 10 ⁻⁴ v	Intensité 10 ⁻⁷ A	Tension 10 ⁻⁴ V	Intensité 10 ⁻⁷ A
20	12,7	2	1,3	—4	2,6
8	5,1	2,2	0,2	—6	4,2
6	3,8	0,6	0,4	—8	5,2
4	2,5	—2	1,5	—20	13

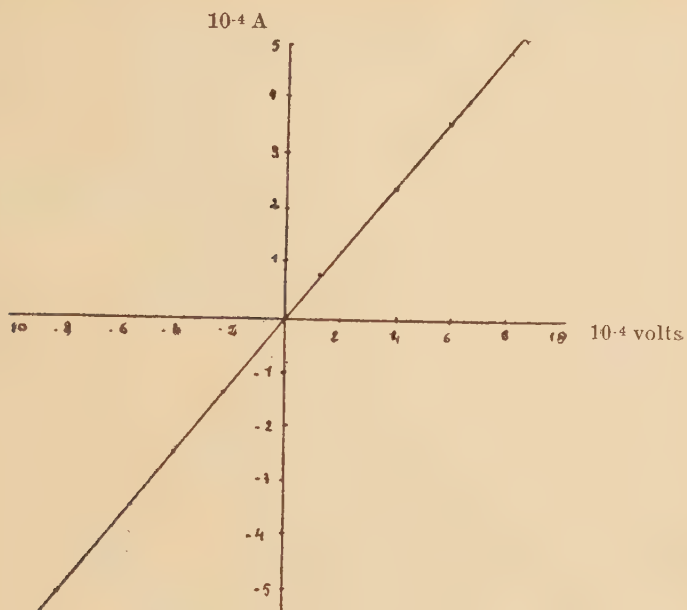


Fig. 5

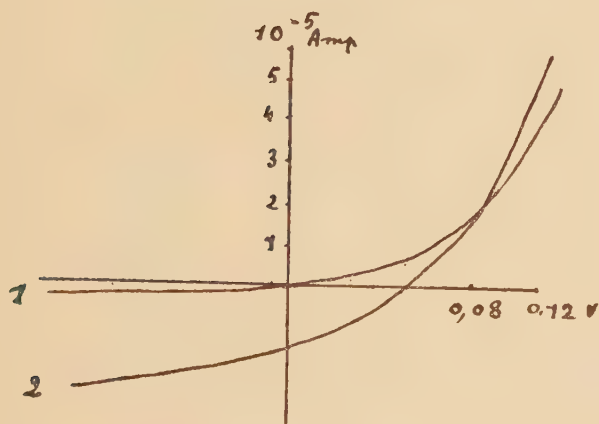


Fig. 6

Dans le cas de la lumière, le rayonnement incident peut être assez important et la fem par effet photo-voltaïque beaucoup plus considérable. Le phénomène se passe dans une région plus éloignée de l'origine que pour les rayons X, alors que la courbe commence à s'incurver vers l'axe des ordonnées et que la loi n'est plus ohmique. Nous reproduisons la courbe de cette région d'après Bergmann pour les cellules au sélénium (fig. 6, courbe 1).

Il est intéressant de se rendre compte de la valeur de la résistance intérieure sous ces différentes tensions :

Un calcul simple nous donne :

Sous 4 volts, électrode supérieure positive de 1.333 à 755 ohms ;

Sous 12 volts, électrode supérieure positive de 300 à moins de 150 ohms.

Pour 4 volts, électrode supérieure négative 4 ohms

Pour 12 volts, électrode supérieure négative 0,8 ohms.
Avec l'une ou l'autre électrode.

Sous 410⁺ volts, elle est de l'ordre de 1.600 ohms.

Nous concluons de cette étude que les cellules ont une résistance constante avec la tension lorsque la différence de potentiel aux bornes est faible, puis décroissante au fur et à mesure que le voltage s'élève. Elles présentent un pouvoir rectifiant croissant avec le voltage (mais non constant dans le temps pour les cellules à base de sélénium).

CHAPITRE III

EFFET PHOTO-ELECTRIQUE

L'effet photo-électrique consiste en la libération d'électrons d'un corps métallique conducteur ou semi-conducteur sous l'action de la lumière.

Dans le cas d'un métal, cet effet se produit suivant la loi d'Einstein : chaque électron expulsé présente une certaine énergie cinétique $\frac{1}{2} m v^2$; si ν est la fréquence du rayonnement incident, on a :

$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - w$$

Dans cette formule, $h\nu$ représente l'énergie d'un « grain de lumière », d'un photon, w le travail d'extraction de l'électron que l'on peut interpréter assez correctement à l'aide de la figure 7 qui représente une coupe de métal



Fig. 7

(d'après L. Brillouin)

considérablement grossie ; les noyaux positifs y sont représentés formant un réseau cristallin, mû seulement par l'agitation thermique ; la trajectoire d'un électron négatif est figurée ; lorsque l'électron sort du métal, il est fortement attiré par la charge positive des noyaux et revient à l'intérieur du conducteur. Il s'établit alors à la surface une double charge : positive, formée par les ions ; négative, formée par les électrons qui retournent en arrière, cette charge négative est représentée par des hachures sur la figure. Le travail w est donc celui nécessaire pour vaincre : l'attraction de la couche positive, la répulsion de la couche négative.

Dans le cas des semi-conducteurs, le travail d'extraction de l'électron est faible, l'effet photo-électrique peut encore être considéré comme dû à la libération d'un électron mal lié, par le mécanisme de l'effet Compton. Nous n'insisterons pas sur ce phénomène qui se trouve étudié dans tous les traités classiques, disons seulement qu'il est constitué par le choc d'un électron et d'un photon, choc à la suite duquel le photon cède une partie seulement de son énergie à l'électron.

Dans le cas des cellules à oxyde de cuivre et à sélénium, l'effet photo-électrique se manifeste par un changement de la résistance de la couche semi-conductrice. Il semble d'ailleurs que cet effet soit compliqué par des modifications physiques, tout au moins pour certaines variétés de sélénium.

Il y a longtemps que l'on sait que la conductibilité du sélénium augmente sous l'action de la lumière. Ce phénomène est naturellement différent selon la nature de l'échantillon employé, mais il est très fidèle à lui-même et même très important pour les variétés principalement étudiées. Sa nature intime a fait l'objet d'un grand nombre de théories ; les unes se ramènent à une étude purement électronique, les autres admettent des transformations d'une forme physique en une autre sous l'action de la lumière. Il semble bien qu'aucun raisonnement ne soit purement satisfaisant, et que suivant l'échantillon considéré, l'un ou l'autre convient plus ou moins. D'ailleurs

l'effet lui-même aurait, suivant les auteurs, une allure très différente. Piersol (1) trouve que la résistance et l'effet photo-voltaïque varient comme la racine carrée du flux incident ; Housson (2) trouve au contraire que cette variation est proportionnelle à l'intensité de l'illumination.

La théorie donnée par Piersol est assez instructive : il admet que le flux incident est absorbé en profondeur suivant une loi exponentielle, l'énergie est donnée à chaque profondeur par :

$$J = AL^{\mu} e^{-\mu x} dx \quad (1)$$

où A et μ sont des constantes, L l'intensité lumineuse incidente, x l'épaisseur de la couche traversée.

Les variations de la résistance (ou de la f e m par effet photo-voltaïque), sont liées à la libération des électrons. Il est logique d'écrire que le nombre de ces électrons est proportionnel à toute profondeur, à l'énergie reçue :

$$N = \alpha AL^{\mu} e^{-\mu x} dx$$

Ces électrons, après un certain parcours vont se recombiner aux ions positifs. Si n est le nombre d'électrons émis par unité de volume, le nombre d'ions positifs susceptible de se combiner sera également n (en comptant double un ion à qui il manquerait deux électrons).

Le nombre total des recombinaisons sera donc :

$$B^2 n^2 A dx$$

B et A étant deux constantes.

Au moment où l'équilibre s'établit, on a autant de recombinaisons que de formations d'ions, d'où

$$n = BL^{\frac{1}{2}}$$

B constante.

Le nombre d'électrons libérés est proportionnel à la racine carrée de l'énergie incidente ; le raisonnement serait d'ailleurs identique si l'on admettait qu'il y a for-

(1) PIERSON, *Physical*, 10, 664, 1927.

(2) HOUSSEON, *Physical*, 29, 924, 1927.

mation d'ions négatifs et positifs, les électrons se fixant immédiatement sur une molécule.

Cette démonstration admet l'existence d'une loi exponentielle d'absorption, c'est-à-dire que l'affaiblissement du faisceau incident est proportionnel d'une part à l'épaisseur de matière traversée, d'autre part au flux incident.

$$dL = \mu L dx$$

ce qui conduit à (1).

Elle ne tient d'ailleurs pas compte des coefficients de réflexion ni des variations allotropiques possibles dans l'état du sélénium pouvant donner lieu à une absorption discontinue de l'énergie.

Mais si l'on admet qu'à chaque photon correspond un électron libéré, que le nombre des électrons susceptibles d'être libérés est grand par rapport au nombre des photons incidents, que le phénomène se produit en surface et non en profondeur, on aura un rapport constant entre la quantité des électrons mise en liberté et celle des photons incidents, la loi devient linéaire (pour un rayonnement monochromatique tout au moins).

Il est évident que dans les cellules photo-voltaïques à base de sélénium on doit retrouver le même effet photo-électrique. Cet effet a une valeur absolue constante avec le temps alors que, comme nous l'avons montré plus haut, la résistance croît avec le temps. En d'autres termes, si, à l'instant initial, la résistance diminue d'une quantité donnée sous l'action de la lumière, à un instant ultérieur elle diminuera de la même quantité ; ce fait peut présenter un certain intérêt théorique. Nous admettons que les phénomènes des variations de la conductibilité avec le temps sont dus à des modifications structurales ; si, d'autre part, la variation de résistance sous l'action de la lumière est liée à une libération d'électrons par les mécanismes ci-dessus décrits, on doit considérer qu'il n'y a aucune relation entre ces deux phénomènes et qu'à tout instant les électrons libérés en même quantité produisent une même variation de résistance.

L'augmentation d'intensité produite par effet photo-

électrique a le même ordre de grandeur que l'intensité débitée par effet photo-voltaïque sous un même éclairément ; ces phénomènes sont très sensiblement de même nature.

Nous reproduisons la caractéristique de la cellule éclairée sur la figure 6, courbe 2. Les points où la courbe coupe l'axe des ordonnées correspondent respectivement à la force électromotrice photo-voltaïque, à l'intensité photo-voltaïque.

Il est à remarquer sur ces courbes que la variation de la résistance ne provient pas uniquement de l'effet photo-voltaïque. Si la différence entre (1) et (2) tenait uniquement à une force électromotrice la différence des ordonnées serait constante dans la partie gauche de la courbe, ce qui n'est pas rigoureusement le cas ; ces deux phénomènes sont néanmoins très voisins.

Pour les cellules à oxyde de cuivre les choses se passent un peu différemment ; la variation de l'intensité est, sous tout voltage, strictement de l'ordre de grandeur de la force électromotrice photo-voltaïque, et paraît n'être due qu'à celle-ci. Il en est d'ailleurs de même dans les cellules à sélénium lorsqu'au lieu de faire agir la lumière on fait agir le rayonnement X. Dans ce cas à tout voltage correspond une variation faible de l'intensité, à peine mesurable lorsque la tension est élevée ; dans une de nos expériences sous un rayonnement de 100 kilo-volts, la variation de l'intensité de courant traversant la cellule était inférieure à 0,1 milliampère pour une intensité totale de 4 milliampères, variation de l'ordre de grandeur du courant produit sans générateur extérieur.

Afin de confirmer ce fait, nous avons monté deux cellules en opposition, nous avons vérifié que, sous l'action du rayonnement X, l'ensemble ne présentait aucune f. e. m., nous avons alors mesuré la résistance de ce système avec et sans irradiation et nous n'avons obtenu aucune variation de l'intensité entre ces deux mesures.

De ceci il semble résulter que les cellules au sélénium

présentent, sous un rayonnement lumineux assez intense, une variation de résistance, importante lorsque la différence de potentiel aux bornes atteint une certaine valeur ; pour une intensité faible (cas des rayons X) et pour tout autre cellule cette variation paraît être un phénomène identiquement de même nature que l'effet photo-voltaïque.

CHAPITRE IV

EFFET PHOTO-VOLTAIQUE

Sous l'action d'un rayonnement lumineux, la cellule présente une force électromotrice entre ses électrodes. Cette force peut être assez élevée lorsque le rayonnement est intense ; elle décroît vers l'ultra-violet, réapparaît sous l'action des rayons X.

Il est intéressant de connaître le mécanisme de sa production. C'est en 1875 qu'Adam a signalé pour la première fois l'effet photo-voltaïque du sélénium qu'il faut se garder de confondre avec sa variation de résistance sous l'action de la lumière ; mais ce n'est guère que ces dernières années que le sujet a été approfondi.

Houson (1) donne le premier les faits principaux concernant le sélénium :

Pour un même éclairement la $f\ e\ m$ indépendante du courant qui passe à travers la cellule.

Sur une grande étendue, la $f\ e\ m$ est proportionnelle à l'intensité d'éclairement.

Pour une même $f\ e\ m$ l'intensité est maximum pour la longueur d'onde = 490.

Il semble que si un temps aussi long s'est écoulé entre la découverte de l'effet et la première étude approfondie,

(1) HOUSON, *Physical*, 29, 924, 1927.

cela tient à la difficulté que l'on a eu jusqu'à ces dernières années à se procurer des cellules au sélénium comparables entre elles. Depuis peu on trouve dans le commerce des cellules constantes à effet photo-voltaïque important. Beaucoup de travaux ont été publiés sur ces éléments, travaux que nous utiliserons en cours de route.

L'effet photo-voltaïque des cellules à oxyde de cuivre a été surtout étudié en Allemagne par Lange, Schottky, Auwer.

Toutes les théories proposées se basent sur la constitution exposée au chapitre premier.

Un élément semi-conducteur se trouve placé entre deux électrodes conductrices et il est séparé de l'une d'entre elles par une couche semi-isolante appelée couche d'arrêt. L'un de ces conducteurs forme une électrode perméable au rayonnement et constitue ce que l'on appelle la face antérieure de la cellule. Selon que la couche d'arrêt est située à la face antérieure ou postérieure, le courant passera dans l'un ou l'autre sens.

Nous avons schématisé, d'après Korosy et Sélény, une cellule à couche d'arrêt antérieure (fig. 8). Lorsqu'un faisceau de rayons lumineux pénètre dans la couche semi-conductrice, il libère les électrons par le mécanisme décrit au chapitre précédent ; une partie de ceux-ci franchit la couche d'arrêt, comme il est représenté sur la figure ; arrivés au niveau du métal ils ont perdu une grande portion de l'énergie cinétique qu'ils avaient à leur libération et ils n'ont plus la force de franchir dans l'autre sens la membrane quasi-isolante ; ils vont donc s'accumuler au niveau de l'électrode antérieure, créant ainsi avec les charges positives restées dans la couches semi-conductrice une différence de potentiel. Lorsqu'on établit un circuit extérieur ces électrons s'écoulent et viennent neutraliser le semi-conducteur ; ils donnent naissance à un courant.

Remarquons d'ailleurs que les électrons libérés par la lumière se propagent dans toutes les directions et qu'une partie seulement se dirige vers la face antérieure ; les autres se fixeront bientôt sur les ions positifs restant, sans contribuer en aucune manière à la formation de diffé-

rence du potentiel. Quelques électrons sont également arrachés au niveau de l'électrode antérieure.

En fait, les choses sont plus compliquées que ne le voudrait cette théorie : les cellules considérées sont également des éléments redresseurs et il est assez difficile d'expliquer l'effet redresseur uniquement par les considérations ci-dessus.

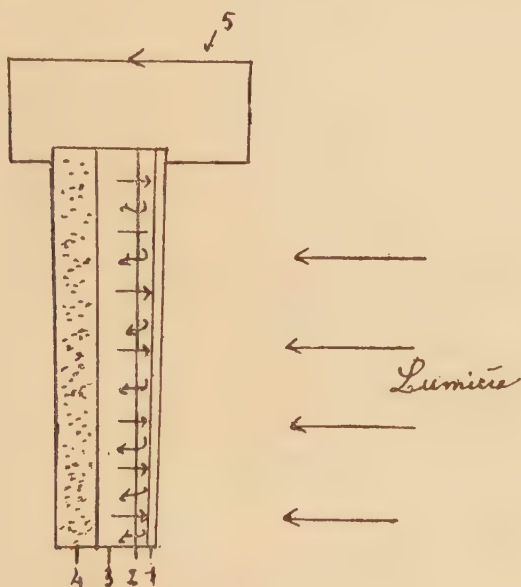


Fig. 8 (d'après Korosy et Seleny)

- 1) Electrode antérieure.
- 2) Couche d'arrêt.
- 3) Semi-conducteur.
- 4) Electrode extérieure.
- 5) Circuit extérieur.

Considérons une différence de potentiel appliquée aux bornes, quel que soit son sens le flux électronique arrivera avec la même énergie. Il ne semble pas que l'on puisse dire que la membrane isolante lui opposera une plus grande résistance dans un sens que dans l'autre. On peut, il est vrai, remarquer que lorsqu'ils arrivent par la face postérieure, les électrons ont perdu une partie de leur

énergie par suite des chocs subits sur les molécules de la couche semi-conductrice ; mais il est plus logique d'admettre qu'à la suite de ces mêmes chocs il y a formation de gros ions (au dépens de molécules gazeuses incluses), qui, eux, à cause de leurs dimensions, ne pourront franchir la couche d'arrêt et céder leur électricité à l'électrode opposée. Il y a alors accumulation de charges au voisinage de la couche d'arrêt s'opposant au passage de l'électricité de même nom. Lorsque le voltage change de sens, les gros ions céderont sans difficulté leur électricité à l'électrode postérieure. Cet effet redresseur, comme nous l'avons vu au chapitre II, ne se produit qu'à partir d'une certaine différence de potentiel dont dépend vraisemblablement la formation des gros ions.

Il est également intéressant de voir la relation théorique qui peut exister entre la f e m photo-voltaïque et la variation de conductibilité sous l'action de la lumière : cette dernière est uniquement due à la libération d'un certain nombre d'électrons indépendamment du sens dans lequel ils se dirigent. Il n'y a donc pas égalité entre les deux effets : la variation de résistance doit être supérieure à la f e m photo-voltaïque ; l'égalité impliquerait que les électrons lancés dans le sens opposé au courant ne puissent revenir en arrière et atteindre l'électrode métallique. Il faut, pour cela, que la différence de potentiel appliquée soit suffisamment élevée et qu'il n'y ait pas d'obstacle important, or les électrons sont freinés par les semi-conducteurs et par la couche d'arrêt, ce qui explique que l'égalité a lieu pour les petits voltages, car alors la différence de potentiel n'est pas suffisante pour vaincre ces résistances.

On peut aussi chercher à se rendre compte du phénomène décrit au chapitre II concernant la variation avec le temps de la résistance (dans le sens redresseur) des cellules à sélénium ; il s'agit probablement d'une modification physique de la couche quasi-isolante sous l'action d'une différence de potentiel suffisamment élevée.

En résumé, la f e m provenant de l'éclairement résulte des deux mécanismes : les électrons libérés par effet photo-

électrique contribueront à la formation d'ions. Dans le cas où la *f e m* est faible, il paraît vraisemblable d'invoquer une théorie purement électronique.

Pour les cellules à parois d'arrêt antérieurs, les électrons utiles sont ceux qui vont dans le sens contraire de la lumière. Pour les cellules à parois d'arrêt postérieure, ce sont ceux qui vont dans le sens de la lumière.

On peut chercher à calculer la différence de potentiel maximum correspondant à une lumière donnée. La relation d'Einstein donne en effet pour l'énergie de l'électron :

$$eV = hv - W$$

où *e* est la charge électronique élémentaire, et *V* le voltage maximum :

$$V = \frac{hv - w}{e}$$

Mais en fait les *f e m* moyennes sont très loin de la différence de potentiel maximum calculée. Ceci tient en partie à l'effet de freinage dû au semi-conducteur ; mais cela provient surtout de l'existence d'électrons de retour. Lorsque nous avons exposé la théorie, nous avons admis que les électrons libérés par la lumière ne revenaient pas en arrière après avoir traversé la couche d'arrêt. Si l'on conservait cette hypothèse il en résulterait, en circuit ouvert, sous l'action de la lumière, un apport considérable d'électrons au niveau de l'électrode antérieure et la *f e m* deviendrait très grande, ce qui n'est pas. En fait, un petit nombre d'électrons, les électrons de retour, reviennent en arrière se recombiner dans la couche demi-conductrice, ils provoquent par là une certaine chute de potentiel. La cellule est donc constamment fermée sur la résistance de sa couche d'arrêt, résistance qui diminue avec la tension.

On a cherché à donner une représentation physique simple de ces cellules. Nous reproduisons dans la figure 9 le modèle donné par Korosy et Seleny ; la région entre pointillés représente l'élément photo-voltaïque. Elle est constituée par une cellule photo-électrique à vide *z*, un redresseur à galène *g*, un condensateur *c*, une résistance *r*.

Le circuit extérieur est représenté par la résistance w . On retrouve ainsi dissociées les différentes caractéristiques électriques de l'élément. Korosy et Seleny en déduisent des courbes théoriques qui ont une allure voisine des courbes expérimentales.

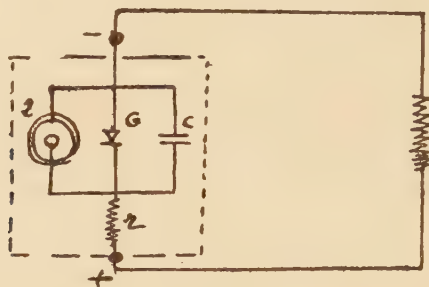


Fig. 9

Nous allons maintenant aborder l'étude de l'effet photo-voltaïque sous l'action du rayonnement X, effet déjà signalé par Thaller.

Le point de départ expérimental est le même : sous l'action des rayons X, les cellules présentent une différence de potentiel ; ce phénomène est surtout marqué dans les cellules à sélénium que nous avons eues entre les mains, beaucoup trop faible dans les cellules à oxyde de cuivre pour être étudié expérimentalement.

Dans ce chapitre nous considérons surtout les modifications à apporter à la théorie : libération des photons de la couche sensible par le rayonnement incident ; mais alors que dans le cas de la lumière les photons ne déplacent que les électrons des couches superficielles de l'atome, le quantum de rayonnement X d'énergie élevée peut chasser les électrons des couches les plus profondes ; les électrons libérés auront une énergie cinétique élevée et un libre parcours moyen plus grand.

Dans le cas du rayonnement lumineux, l'électrode antérieure atténue également toutes les radiations ; la portion

du faisceau qui n'est pas réfléchi est entièrement transformée dans la partie superficielle du semi-conducteur soit en énergie électrique, soit en chaleur ; les différentes longueurs d'onde ne sont inégalement absorbées que par la couche sensible, l'épaisseur de la couche antérieure étant trop faible pour que son action sélective soit appréciable. Dans le cas des rayons X, au contraire, une faible partie du faisceau est absorbée tant par la couche antérieure que par la couche sensible, celle-ci reçoit à toutes profondeurs une proportion sensiblement égale du rayonnement (grâce à sa faible épaisseur) (1). Mais il se présente un phénomène de discontinuité lorsque la longueur d'onde du rayonnement incident atteint celle des raies caractéristiques des constituants de l'élément. Il y a alors une grande augmentation de l'absorption, un accroissement considérable de l'effet photo-électrique. On doit alors prévoir une modification importante dans le régime de la cellule.

Enfin, l'énergie que nous avons à notre disposition est beaucoup plus petite dans le cas de la pratique radiologique courante que dans le cas de la lumière.

(1) Voir la démonstration de ce fait, chapitre VI.

CHAPITRE V

AUTRES MODELES DE CELLULES PHOTO-VOLTAIQUES SECHES

Nous voudrions, pour être complet, faire une courte étude des cellules de Bergmann (1), d'un type très spécial que nous n'avons malheureusement pu avoir entre les mains.

La cellule est formée de la manière suivante :

Deux lamelles de verre sont recouvertes d'une fine couche métallique, la couche sensible est introduite entre ces lamelles. L'ensemble est disposé de manière qu'on ait d'avant en arrière :

une électrode d'or,
une lamelle de verre,
la couche semi-conductrice,
une lamelle de verre,
une électrode d'or.

On voit que cette constitution ne ressemble en rien à celle des cellules étudiées et que l'on a un véritable condensateur à diélectrique composite (fig. 10).

Les deux électrodes extrêmes étaient reliées aux bornes

(1) BERGMANN, *Phyz.*, 25, 33, p. 209, 1932.

d'un amplificateur à lampes. Cette cellule était éclairée sur une de ses faces par une lumière intermittente et produisait une f e m alternative détectée par l'amplification.

Bergmann attribue cet effet au fait que le rayonnement libère les électrons dans le semi-conducteur et cela en proportions variables suivant la profondeur ; d'où formation d'une charge négative au niveau de l'un des plateaux, charge variable dans le circuit extérieur.

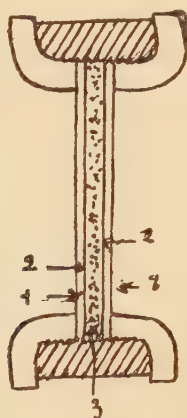


Fig. 10

- 1) Electrode en or obtenue par pulvérisateur cathodique.
- 2) Lame de verre.
- 3) Couche sensible.

Bergmann a employé un grand nombre de substances semi-conductrices :

(Se) Sélénium en modification métallique grise.

(I) Iode.

(Cu²O) Sous-oxyde de cuivre obtenu par préparation sur du cuivre pur pulvérisé de Kohlbaum.

(CuI) Iodure de cuivre ; précipité électrologiquement sur le cuivre.

(Cu²I²2HgI²) Cuivre mercuriiodure ; pulvérisé.

(Ag²O) Oxyde d'argent pur ; pulvérisé de K.

- (Ag²S) Sulfure d'argent pur ; pulvérisé de K.
 (AgI) Iodure d'argent ; précipité électrolytique sur argent.
 (AgCl) Chlorure d'argent ; précipité électrolytique sur argent.
 (Ag²I²HgI²) Argent mercuriiodique ; pulvérisé.
 (CdS) Sulfure de cadmium ; pulvérisé.
 (HgS) Sulfure de mercure ; pulvérisé.
 (HgI²) Iodure de mercure.
 (Pb³O⁴) Minium ; pulvérisé.
 (Th²S) Sulfure de thallium ; pulvérisé.
 (SbS) Sulfure d'antimoine ; pulvérisé et cristallisé.
 (MbS²) Molybdénite ; cristallisé.

Tous ces corps ont été soit précipités sur le porte-plaque, mais plutôt employés sous forme de poudres ; dans ce dernier cas, une quantité extrêmement petite de la substance en question était suffisante.

Il semble que l'on puisse prévoir que le maximum du phénomène correspondra au maximum d'absorption de la substance étudiée, ce qui permet, d'une part, d'étudier les coefficients d'absorption des différentes substances, d'autre part de choisir une substance sensible appropriée à chaque longueur d'onde.

L'on obtient d'ailleurs des modifications : diminution ou amplification du phénomène en éclairant la cellule par de la lumière continue ; nous résumons ci-dessous les résultats en numérotant les faces de la cellule 1 et 2 :

Lumière intermittente du côté 1	effet dans l'amplificateur.
Lumière intermittente du côté 2	d°
Lumière intermittente synchrone de même intensité des deux côtés.....	effet nul.
Lumières intermittentes de même intensité des deux côtés, mais décalées d'une demi-période	effet double.

- Lumière intermittente du
côté 1, plus lumière con-
tinue du côté 1..... effet diminué.
- Lumière intermittente du
côté 1, plus lumière con-
tinue côté 2..... effet accru d'autant que la
couche est plus mince.

En fait, dans le dernier cas, l'effet d'accroissement n'a lieu que si la lumière continue pénètre jusqu'à la face antérieure de la cellule ; cet effet est d'ailleurs assez difficile à expliquer.

Il est à remarquer que l'effet atteint très vite une saturation. Dans les courbes données par Bergmann, la saturation est atteinte pour des éclairagements de l'ordre de 12 lux.

Signalons en outre les piles photo-voltaïques à liquide qui produisent une différence de potentiel lorsqu'une électrode est éclairée ; elles ont été particulièrement étudiées en France par Audubert.

CHAPITRE VI

ETUDE DE L'EFFET PHOTO-VOLTAÏQUE EN FONCTION DE L'INTENSITE DU RAYONNEMENT

Pour pouvoir utiliser les éléments photo-voltaïques comme instrument de mesure, il faut avant tout connaître la loi qui relie l'intensité du courant débité dans le circuit extérieur à l'intensité du rayonnement incident.

Dans le cas général, il n'y a pas proportionnalité entre ces deux facteurs. La courbe, intensité débitée en fonction du flux, s'incurve vers l'axe des ordonnées. Elle est d'ailleurs très variable suivant la valeur de la résistance extérieure et se rapproche de la ligne droite lorsque la résistance extérieure devient très faible et que l'intensité lumineuse n'est pas trop forte. Il en est de même pour la f e m mesurée par une méthode d'opposition en circuit ouvert. On pourra se reporter aux courbes données par Korosy et Seleny dont le travail a été cité plus haut.

Plusieurs auteurs ont cherché sans résultat à mettre les courbes en équation.

Bartlett (1) donne une forme empirique valable dans un certain espace :

$$i = sf - Kf^n R \text{ microampères}$$

i courant débité,

f flux lumineux en bougies.

R résistance extérieure en ohms,

s, K, n coefficients.

(1) BARTLETT, *Review of Scientific Instrument*, 3, 10, 1932, p. 543.

Le premier terme du deuxième membre représente le courant du court-circuit, proportionnel à l'éclairement ; le deuxième terme est un terme soustractif dépendant de l'éclairement et de la résistance extérieure, il représenterait le courant intérieur de retour.

Cette formule serait valable sans grande erreur pour :

$$R < 700 \text{ ohms}$$

$$25 \text{ bougies} < f < 250 \text{ bougies}$$

dans ce cas n est voisin de 1,73.

La résistance r est évidemment sous-entendue dans les coefficients ; si i' est le courant intérieur on a :

$$i' r = i R$$

$$i' = \frac{i R}{r}$$

et en substituant pour i' le second terme du deuxième membre de (1) on aura pour r

$$r = \frac{1}{K b^n}$$

$$= \frac{s}{K f^{n-1}} - R$$

En partant de ces équations, Bartlett exprime l'énergie et le voltage ; il cherche par dérivation les conditions qui rendent les expressions maximum. Il trouve en particulier que le maximum de l'énergie sera obtenu pour :

$$R = \frac{r}{2}$$

On sait que pour une loi linéaire la sensibilité maximum est donnée par :

$$r = R$$

Ce raisonnement est très empirique et ne peut conduire à aucune conclusion ni pratique ni théorique. Nous ne

connaissions pas la résistance r et nous ne pouvons la connaître du fait qu'elle varie avec chacun des facteurs.

On peut également remarquer que la courbe considérée a une allure générale se rapprochant de la parabole. On pourrait refaire alors le raisonnement de Piersol exposé au chapitre III.

La forme de la courbe provient principalement de la variation de la résistance intérieure, résistance conditionnée par la présence des électrons de retour. On peut considérer la cellule comme un générateur présentant une fem proportionnelle à l'éclairement, le courant se répartit en deux circuits : l'un formé par les électrons de retour d'intensité i' , l'autre constitué par le circuit extérieur d'intensité i . L'intensité totale débitée est alors :

$$I = i + i'$$

$$\text{La } fem$$

$$E = i R = i' r$$

Remarquons que r dépend de E et supposons la résistance extérieure constante, inférieure à r , alors que l'intensité lumineuse varie :

Les électrons produits par effet photo-voltaïque et qui franchissent la couche d'arrêt sont sensiblement proportionnels en nombre au flux lumineux. Pour un faible éclairement ils sont peu nombreux et s'écoulent dans le circuit extérieur. Au fur et à mesure que l'éclairement augmente leur nombre croît et la tension aux bornes du circuit extérieur mesurée par iR augmente ; il arrive un moment où elle est suffisante pour permettre aux électrons de faire retour par la membrane quasi isolante : la résistance r a diminué sensiblement. On aura alors deux circuits, l'un extérieur, l'autre intérieur, et comme r diminue, le courant intérieur ne sera pas proportionnel à l'intensité lumineuse, il en sera par conséquent de même du courant extérieur.

Si l'on considère l'intensité lumineuse comme constante et si l'on fait varier la résistance, le même raisonnement vaut encore.

Ce raisonnement montre qu'une loi linéaire doit exister

pour de faibles intensités et de faibles résistances extérieures ; en particulier si la résistance extérieure est nulle, l'intensité du courant débité est rigoureusement proportionnel au flux, il faudrait un flux considérable pour incurver la courbe et il est vraisemblable que la saturation photo-électrique du semi-conducteur interviendrait auparavant. Il en est de même si l'intensité lumineuse est très faible.

Pour les rayons X, nous avons fait un grand nombre de mesures en vue de vérifier la proportionnalité entre l'intensité rayonnante et l'intensité du courant débité par les cellules. Nous avons pour cela utilisé une tension constante de 120 kilovolts. Nous avons obtenu des quantités différentes de rayons X, soit en faisant varier la distance de la cellule à l'anti-cathode, soit en faisant varier le rayonnement émis par l'ampoule ; dans le premier cas la quantité de rayons est inversement proportionnelle au carré de la distance ; dans le second cas la mesure se faisait à l'aide d'un milli-ampèremètre placé dans le circuit de l'ampoule, l'étalonnage de ce milliampèremètre avait été vérifié auparavant ; à chaque opération la tension était ramenée à la même valeur et mesurée à l'aide du voltmètre électrostatique d'Abraham Villars. La cellule était reliée à un galvanomètre de résistance intérieure voisine de 10 ohms ; une boîte de résistance permettait de faire varier la résistance du circuit extérieur. Une enveloppe métallique mise au sol entourait les fils de connexion ; l'un des pôles était également réuni à la terre. Nous avons été obligé d'éloigner considérablement le galvanomètre du générateur à rayons X afin d'éviter tout phénomène d'ionisation parasite. La constance du zéro était vérifiée en interposant un écran de plomb de 1 cm. d'épaisseur sur le trajet des rayons X. Un papier noir collé sur les bords de l'élément photo-voltaïque empêchait tout passage de rayons lumineux.

Les résultats peuvent se classer en deux catégories : dans le premier cas, la cellule était au voisinage d'une ampoule Philips, placée à 10 à 30 cm. de l'anti-cathode.

La variation du courant débité n'est pas alors proportionnelle à l'intensité des rayons, mais s'en rapproche suffisamment pour une résistance extérieure inférieure à 10.000 ohms.

Les autres mesures ont été faites en plaçant la cellule à environ 65 cm. de l'anti-cathode. Elle montre une proportionnalité rigoureuse entre l'intensité débitée et l'intensité d'éclairement, ceci quelle que soit la résistance extérieure.

TABLEAU V

Intensité débitée par la cellule (unité arbitraire) en fonction de l'intensité passant dans l'ampoule

Tension 100 kv., filtre $\frac{1}{2}$ Al. La cellule était à 20 cm. de l'ampoule.

	1 Milli	2 Mi(li	3 Milli	4 Milli	5 Milli
R=0hms	9	16	22	28,5	34,7
R=10.000 ohms	4,9	8	11	14	16

TABLEAU VI.

Intensité débitée par la cellule en fonction de la distance

Tension 100 kv., filtre 0,3 Cu + 2 Al, intensité 3 milli.

	10 %	15 %	20 %	25 %	30 %
R = 10 ohms	0,57	0,35	0,20	0,13	0,9
R=100.000 ohms	2,15	1,15	0,7	0,4	0,35

Les résultats de la première catégorie paraissent imputables au fait que la cellule était très près de l'ampoule ; elle est alors soumise à un rayonnement calorifique non

TABLEAU VII

Mêmes conditions que le tableau V, mais cellule à 65 cm.,
tension à 80 kv., filtre $\frac{1}{2}$ Al

	1 Milli	2 Milli	3 Milli	4 Milli	5 Milli
R = 10 ohms	1,2	3,4	5,05	6,6	8,5
R = 1.000 ohms	1,1	2	3	3 6	5
R = 10.000 ohms	0,15	0,30	0,4	0,55	0,7

TABLEAU VIII

Variation de la F e m en fonction de l'intensité incidente

Mêmes conditions qu'au tableau VII

	1 Milli	2 Milli	3 Milli	4 Milli	5 Milli
F e m en milli volts	0,4	0,52	0,70	0,84	1

TABLEAU IX

Intensité débitée en fonction de l'inclinaison

0	25°	45°	70°	80°	90°
0,64	0,64	0,64	0,60	0,54	0,40
2,4	2,4	2,3	1,2	1,6	
4	3,7	3,25	3,25	3,0	2,5

négligeable ; en outre du rayonnement est émis par toutes la face terminale de l'anti-cathode dont l'épaisseur doit entrer en ligne de compte pour une si faible distance. On remarque en effet, sur le tableau VI, que l'intensité débitée lorsque la cellule est à 10 cm., n'est pas quatre fois plus grande que celle qui correspond à une distance de 20 cm., alors que la loi du carré intervient déjà entre 15 et 30 cm.

Dans la pratique courante, on peut considérer qu'il y a proportionnalité entre la quantité de rayonnement et l'intensité du courant débité, à condition bien entendu que les rayons X incidents soient toujours de même qualité et que leur intensité ne soit pas trop forte (cas de la radiographie).

Nous avons fait également les mesures de la fem en fonction de l'intensité incidente. Nous en reproduisons une série dans le tableau VIII. La cellule était branchée sur un réducteur de potentiel en opposition avec une pile de 4 volts ; le rayonnement était filtré par 0,3 mm. de Cu plus 1/2 mm. d'Al.

La loi n'est pas linéaire ; mais on remarque que la fem est beaucoup plus grande que celle qui devrait correspondre à l'intensité débitée dans le circuit extérieur pour les expériences ci-dessus. En se rapportant à la figure 6, on voit qu'elle correspond déjà à une région où la caractéristique s'incurve.

Il nous a paru intéressant de nous rendre compte de l'influence de l'inclinaison de la cellule par rapport au faisceau incident sur la quantité de courant débité.

Dans le cas du rayonnement lumineux, la quantité de rayons absorbée varie comme le cosinus de l'angle d'incidence du faisceau. Il n'en est rigoureusement de même de la variation du courant photo-voltaïque que pour des résistances extérieures très faibles, ce qui résulte évidemment des considérations exposées plus haut.

Par contre, les mesures très nombreuses que nous avons faites sur les rayons X nous ont toujours montré une grande constance de l'intensité débitée, quel que soit l'angle d'incidence. Nous reproduisons ici deux séries de

LES CELLULES PHOTO-VOLTAÏQUES

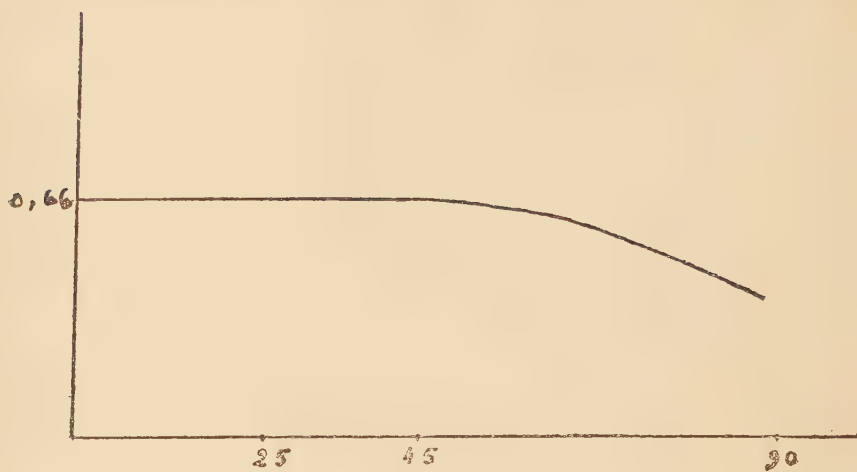


Fig. 11



Fig. 12

chiffres. On a une croissance très légère de l'intensité lumineuse avec l'angle des normales jusqu'au moment où celui-ci devient voisin de 85° . A ce moment, il ne nous est plus possible de faire une mesure correcte, le rebord d'ébène de la cellule entrant dans le faisceau incident et le filtrant en partie (fig. 11).

Une autre série de courbes montre une décroissance un peu plus prononcée, vers 25° , puis l'allure générale reste la même (fig. 12).

La différence entre ces deux séries de courbes doit tenir à ce que la seconde a été faite avec des rayonnements non filtrés, et une cellule ayant une électrode supérieure en plomb plus absorbante que les électrodes d'or. Il semble que dans ce cas l'inclinaison ait augmenté, dans une proportion appréciable, l'absorption des rayons très mous par la couche antérieure.

A quoi doit-on attribuer le fait que l'effet photo-voltaïque varie comme un cosinus sous l'action de la lumière, alors qu'il ne dépend que faiblement de l'angle de rotation sous l'action des rayons X.

Tout le rayonnement lumineux qui n'est pas réfléchi est absorbé dans le semi-conducteur ; la cellule reçoit un flux proportionnel à la surface normale au faisceau, donc variant lorsque cette surface s'incline comme le cosinus de l'angle de rotation. Dans le cas du rayonnement X, il n'y a qu'une faible partie du faisceau qui est absorbée dans le semi-conducteur, à chaque profondeur. La proportion en est donnée par la loi classique :

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

Lorsque l'angle varie, la surface présentée par la couche sensible est moins grande, mais l'épaisseur de cette couche augmente ; il est immédiat de voir que l'épaisseur à traverser est inversement proportionnelle au cosinus de l'angle de rotation.

Il en résulte que la quantité de rayons X est alors absorbée par une surface :

$$s' = s \cos \alpha$$

α angle de rotation,
mais par une épaisseur

$$l' = \frac{l}{\cos \alpha}$$

Cherchant à voir quelle est la proportion de rayons X absorbés par une couche d'épaisseur l ,

d'après (1) on aura :

$$J = I_0 \int_0^l e^{-\mu x} dx$$

en intégrant

$$J = -\frac{1}{\mu} I_0 (e^{-\mu l} - 1) \quad (2)$$

l est petit, sûrement inférieur au 1/100^e de millimètre, μ doit être voisin de l'unité pour les radiations employées; en développant l'exponentielle en série et en se limitant aux deux premiers termes, on a avec une bonne approximation :

$$J = I_0 l$$

comme le flux pénétrant dans la cellule est proportionnel à la surface on aura pour un angle

$$\begin{aligned} J_0' &= I_0 s' \\ J &= K I_0' \end{aligned}$$

d'où

$$\begin{aligned} J &= K I_0 \cos \alpha l' \\ &= K I_0 \end{aligned}$$

on voit donc que tant que l est assez petit pour que l'on puisse développer sans grande erreur l'expression (2) il n'y a pas de variation de l'énergie absorbée.

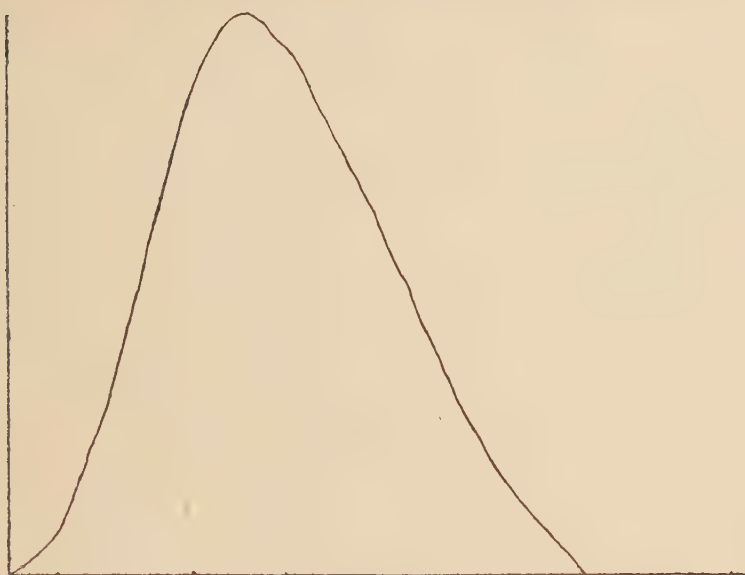
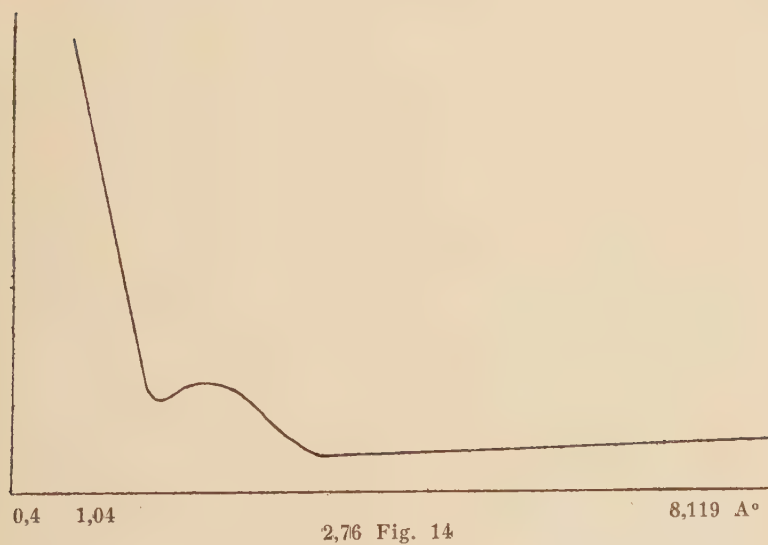


Fig. 13



2,76 Fig. 14

CHAPITRE VII

EFFET PHOTO-VOLTAÏQUE EN FONCTION DE LA LONGUEUR D'ONDE DU RAYONNEMENT INCIDENT

Pour que les cellules photo-voltaïques puissent servir à la mesure de l'intensité des rayonnement hétérogènes, il est nécessaire que la quantité du courant débité soit peu sensible à la variation de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Les courbes concernant le spectre visible ont été établies par beaucoup d'auteurs pour chaque sorte de cellule. Nous reproduisons ici la courbe donnée par Bergmann pour les cellules S.A.F. (fig. 13). Contrairement à l'impression donnée par la figure, les cellules sont encore sensibles dans l'infra-rouge et l'ultra-violet, seulement le courant est faiblement décelable à l'aide d'un instrument à aiguille et ne peut être mesuré que par un galvanomètre à miroir.

Nous avons essayé de nous rendre compte de cette sensibilité aux deux extrémités du spectre. Pour l'ultra-violet, la cellule est branchée directement sur un galvanomètre sensible à 10^{-11} ampères, et dont la résistance du cadre est voisine de 10 ohms. La source est une lampe à vapeur de mercure placée à une extrémité d'un monochromateur à prisme de quartz. Il faut remarquer que par ce dispositif une surface très faible de la cellule est éclairée et que la source est située fort loin de la surface sensible. Lorsque l'on agit sur le monochromateur, on a au passage

de chacune des raies ultra-violettes du mercure un déplacement du spot du galvanomètre ; ce déplacement est très petit mais parfaitement décelable.

Nous avons fait une autre série d'expériences à l'aide d'une lampe à hydrogène ; on sait qu'une telle lampe donne un très faible éclaircissement dans le visible et une très grande intensité dans l'ultra-violet. La cellule est branchée en série avec un micro-ampèremètre ; tout d'abord, elle reçoit la faible lumière due à l'éclairage de la pièce, la déviation est alors de 0,5 micro ; on place ensuite la lampe à hydrogène, la déviation monte à 2,5 micro. On interpose un verre blanc mince ; de cette façon la cellule est soumise à un rayonnement qui va du violet jusqu'à la longueur d'onde de 3.000 angstrom, les rayons de longueur d'onde plus courte sont arrêtés. On interpose enfin un verre de wood arrêtant la totalité du rayonnement lumineux ; la déviation tombe alors à 0,05. On enlève les filtres et on arrête la lampe à hydrogène pour vérifier que l'éclaircissement de la pièce produit une déviation de 0,5 micro.

La déviation était, en presque totalité, due à la portion visible du rayonnement émis par la lampe à hydrogène et l'effet photo-voltaïque était excessivement faible dans l'ultra-violet. On sait d'ailleurs que les rayons ultra-violets sont très peu pénétrants, il est vraisemblable qu'ils n'atteignent que la partie superficielle de la couche sensible ; il est même probable qu'ils sont en grande partie absorbés par l'électrode antérieure. Nous rappelons à ce propos les expériences faites par P. Auger sur les coefficients d'absorption, expériences qui ont été signalées au premier chapitre.

Les rayons infra-rouges sont au contraire beaucoup plus pénétrants, mais une difficulté se présente, due à l'effet thermo-électrique des cellules. Or, les générateurs infra-rouges présentent un pouvoir calorifique très élevé ; il est donc à craindre que l'on ne puisse avoir une grande stabilité dans la mesure.

Dans une de nos expériences, la cellule était soumise à l'éclaircissement d'une lampe électrique de 16 bougies à filament de carbone, située à 35 cm. et produisait dans la cel-

lule 10 micro-ampères ; un verre IK 570 de Saint-Gobain absorbant complètement le visible et ne laissant passer que l'infra-rouge au delà de 8.100 Angstrom était interposé ; l'intensité tombait alors à 0,9 micro-ampère. Il est à remarquer que notre source n'était pas particulièrement riche en infra-rouge et que ce chiffre indique donc une sensibilité appréciable.

Nous avons mesuré l'intensité débitée en fonction de la longueur d'onde pour le rayonnement X.

Pour les très grandes longueurs d'onde, les mesures ont été faites par le Docteur Dognon, avec son ampoule à anticathode interchangeable donnant un rayonnement quasi-monochromatique. L'intensité était mesurée à l'aide d'une chambre d'ionisation cylindrique de 10 cm. de hauteur.

Pour les longueurs d'onde moyennes, nous avons employé un appareil à tension constante ; nous avons approximativement délimité un certain nombre de régions du spectre en réglant d'une part la tension aux bornes de l'ampoule, d'autre part, la filtration : une élévation de tension augmente la longueur d'onde, le filtre supprime les rayons mous. Pour mesurer la qualité des rayons de chacune de ces régions, nous avons employé la chambre de Kustner :

Une première mesure donnait l'intensité du rayonnement incident en r internationaux.

TABLEAU X

Rapport de l'intensité de rayonnement mesurée avec la cellule et celle mesurée avec une chambre d'ionisation de 10 cm.

Longueur d'onde	0,4	0,99	1,04	1,12	1,36	1,54	2,28	2,76	8,39
Intensité	4,24	2,13	1,79	6,13	6,92	1	0,84	0,37	0,57

TABLEAU XI

*Rapport de l'intensité de rayonnement
mesuré avec la cellule à celle mesurée avec une planche
de Kustner*

Tension	Filtre	Longueur d'onde moyenne λ_0	Courant débité cellule S. A. F.	Courant débité cellule Weston
50	0	0,52	4,57	4,48
60	0,5 Al	0,50	5,72	6,5
70	1 Al	0,43	6,88	6,65
80	2 Al	0,35	6,38	7,07
90	4 Al	0,32	8,8	8,24
100	0,5 $\omega+2$ Al	0,18	4,77	6,22
150	0,5 $\omega+2$ Al	0,16	4,5	6,6
200	1 $\omega+2$ Al	0,125	4	5,14
200	1,5 $\omega+2$ Al	0,09	2	4,5

Une deuxième mesure était faite avec une faible filtration ; elle nous permettait de calculer le coefficient d'absorption du filtre et par là la longueur d'onde.

On a, en effet :

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

I_0 correspond à la mesure avant la filtration supplémentaire.

I à la même mesure après cette filtration.

x est l'épaisseur du filtre.

μ est le coefficient d'absorption du filtre.

On en déduit :

$$\mu = \frac{1}{x} \frac{1}{\log} \log \frac{I_0}{I}$$

or

$$\mu = \sigma + \tau$$

ou σ correspond à l'effet de diffusion ;

ou τ ——— d'absorption.

est tout à fait négligeable comparativement aux erreurs d'expériences et l'on peut confondre μ avec τ . On a alors des tables (Thibaut, De Broglie) qui donnent la longueur

d'onde pour chaque coefficient d'absorption massique $\frac{\tau}{\rho}$ (ρ densité du métal).

Pour les tensions de 150 à 200 kilovolts, nous avons utilisé la tension constante du service de radiologie de l'Hôpital Saint-Louis. Les mesures de quantité ont alors été faites avec un Hammer que nous avons au préalable comparé à notre chambre de Kustner. Le même procédé permettait d'avoir μ .

La quantité de rayons X reçue par la cellule était variable à chaque expérience ; il a fallu rapporter tous les résultats à une même intensité du faisceau incident ; ce qui a été fait par une simple règle de trois, opération légitime puisqu'il y a proportionnalité entre le flux du rayonnement X et l'intensité débitée par la cellule.

Naturellement, les précautions énumérées au chapitre précédent avaient été prises afin d'éviter toute action parasite. La résistance intérieure du galvanomètre était de 10 ohms.

Les résultats sont figurés par les courbes de la figure. Les courbes 14 et 15 ont été faites avec une cellule S. A. F. construite spécialement pour la lumière, électrode antérieure en or. La courbe 1 faite par le professeur Dognon correspond aux grandes longueurs d'onde : elle montre, vers la gauche, deux variations brutales de l'intensité ; la seconde débute très sensiblement au niveau de la discontinuité d'absorption du sélénium ; à partir de cette longueur le coefficient d'absorption de ce corps devient considérablement plus grand et une beaucoup plus grande quantité de rayons est retenue dans la couche sensible. Il semble que le palier le plus à droite corresponde à la discontinuité d'absorption d'un élément dont la nature ne nous a pas été précisée.

Les courbes 15 et 16 correspondent aux mesures faites avec la tension constante. La courbe 16 provient d'un élément Weston redresseur à électrode antérieure au plomb. Sur ces courbes on remarque un maximum au niveau des longueurs d'onde de 90 kilovolts correspondant vraisemblablement à l'excitation de la raie caractéristique de l'électrode antérieure. Remarquons que les chiffres de lon-

LES CELLULES PHOTO-VOLTAÏQUES



Fig. 15



Fig. 16

Angstroms

gueur d'onde inscrits sur l'axe des ordonnées correspondent aux longueurs d'onde moyennes de chaque faisceau ; la longueur d'onde maximum est donnée pour chacun par la relation d'Einstein. Ce maximum est paradoxal car il correspond au maximum d'absorption de l'électrode antérieure ; il devrait donc y avoir dans cette région un moins grand nombre de rayons à franchir cette électrode et par conséquent un minimum de sensibilité. Mais l'électrode antérieure a une épaisseur infime, son absorption est négligeable ; elle présente par contre pour ces longueurs d'ondes une grosse réémission d'électrons, électrons dont l'action doit s'ajouter à celle des électrons provenant de la couche sensible.

Les points correspondants aux tensions de 70 et 150 kilovolts ont sensiblement la même ordonnée et si l'on en excepte le maximum précédemment signalé, la courbe a une sensibilité presque constante dans la région étudiée. La courbe faite avec l'élément redresseur présente une sensibilité plus forte dans les grandes longueurs d'ondes ; ceci paraît dû à une épaisseur plus grande de la couche sensible.

Il est très difficile d'obtenir les courbes de la force électro-motrice en fonction de la longueur d'ondes, du fait qu'il n'y a pas proportionnalité entre les intensités incidentes et la F. E. M. ; nous devons, en effet, pour que les résultats soient corrects, ramener toutes les intensités rayonnantes à la même valeur, ce que nous ne pouvons faire dans ce cas. Nous avons alors essayé de construire cette courbe en plaçant notre cellule à des distances variables de l'anti-cathode de façon à recevoir chaque fois la même quantité de rayons sur la surface sensible. Nous donnons, à titre d'indication, trois chiffres trouvés avec la tension constante de 120 kilovolts du Laboratoire de Physique :

	$\lambda = 0,65$ angstroms	$\lambda = 0,35$	$\lambda = 0,20$
cel. 1	$0,04 \cdot 10^{-4}$ volts	$6,4 \cdot 10^{-4}$ volts	$0,8 \cdot 10^{-4}$ volts
cel. 2	$1,65 \cdot 10^{-4}$ volts	$5,4 \cdot 10^{-4}$ volts	$2 \cdot 10^{-4}$ volts

Ces résultats sont assez approchés, mais on peut tout

de même en tirer les mêmes conclusions que dans l'étude de l'intensité et remarquer en particulier la grosse différence entre les mesures extrêmes, sensiblement égales, et la mesure médiane correspondant, comme plus haut, à la grosse charge électronique produite en avant de la couche d'arrêts par l'électrode antérieure.

Nous avons cherché à voir ce qui se produisait aux très courtes longueurs d'ondes ; la cellule a été soumise à l'action de 10 milligrammes de radium et nous n'avons pu obtenir aucune force électromotrice, si courte que soit la distance à laquelle nous avons opéré.

CHAPITRE VIII

COEFFICIENT THERMOELECTRIQUE INERTIE - FATIGABILITE - FIDELITE SENSIBILITE

Coefficient thermo-électrique

L'influence de la chaleur sur l'effet photo-voltaïque sous l'action de la lumière a été indiquée par plusieurs auteurs qui ont attribué aux cellules un coefficient thermique assez élevé.

Nous avons fait diverses mesures sous l'action du rayonnement X en plaçant tout d'abord notre cellule dans un mélange réfrigérant produisant une température voisine de 0°, puis dans une boîte chauffante où la température était progressivement augmentée à l'aide d'une résistance électrique : nous avons trouvé les résultats suivants :

Dans la glace fondante sous un rayonnement de 100 kv., filtré par 2 mm. d'Al (intensité 3 milliampères), la cellule débite un courant de 0,05 micro-ampère, à la température ambiante (25°), 0,2 micro-ampère. L'élévation de température produit une force électromotrice indépendamment de l'action de tout rayonnement.

à 50°	à 70°	à 85°
0,2 micro.	0,4 micro.	0,45 micro.

Le rayonnement a augmenté cette intensité de 0,2 micro-ampère à toute température.

Inertie

Les cellules photo-voltaïques présentent une inertie très faible. Bergmann n'en a pas trouvé jusqu'à une fréquence de 7.000 périodes secondes. Toutefois, différents ingénieurs ont montré que cette inertie était trop grande pour permettre l'usage des éléments en vue du cinéma parlant.

Nous n'avons pas eu d'appareil d'inertie suffisamment faible et de sensibilité assez grande pour faire ces mesures sous l'action des rayons X ; mais il est évident, d'après ce qui précède, que la F. E. M. photo-voltaïque doit suivre rigoureusement les variations en quantité du rayonnement X.

Fatigabilité - Fidélité

Bergmann trouve une légère baisse de l'intensité débitée au bout de vingt minutes d'action du rayonnement lumineux. Nous n'avons rien trouvé de semblable sous l'action des rayons X. D'autre part, les résultats des mesures ont toujours été retrouvés identiques à eux-mêmes au bout de plusieurs jours, lorsque les conditions de température sont semblables.

Sensibilité

La sensibilité des éléments au sélénium que nous avons eus entre les mains est de 0,02 à 0,03 micro-ampère par r international selon l'élément étudié, selon la longueur d'onde considérée entre 90 et 150 kilovolts.

La sensibilité de la cellule à oxyde de cuivre est vingt fois moindre ; mais elle a un diamètre de 1 cm. 5, alors que les cellules S. A. F. ont un diamètre de 3,5 cm., ce qui correspond à une surface à peu près 5 fois plus grande. Si la sensibilité était rigoureusement proportionnelle à la surface, les cellules à oxyde de cuivre seraient quatre fois moins sensibles que celles à sélénium ; la S. A. F. fabrique des cellules de surface différente, et il semble que les sensibilités varient considérablement moins que les surfaces. Nous avons mesuré la sensibilité de deux cellules

de surface égale, de même nature, branchées en parallèle, et nous avons trouvé :

Cellule 1	Cellule 2	2 cel. en parallèle
0,35	0,34	0,62 micro-ampère

Ici également il n'y a pas proportionnalité rigoureuse entre la surface et l'intensité débitée, mais remarquons que la résistance du circuit extérieur est très faible et que le fait de mettre deux cellules en parallèle change considérablement la résistance intérieure de l'ensemble.

Nous avons cherché à voir comment on pourrait augmenter la sensibilité de ces cellules sous l'action des rayons X.

On peut, comme nous venons de le montrer, accroître leur surface.

On peut augmenter l'épaisseur du semi-conducteur. Dans les cellules que nous avons étudiées, elle est inférieure à $10\ \mu$; la proportion de rayons X absorbée est très faible ; pour une épaisseur plus grande, la résistance variera peu et il y aura une quantité plus grande de rayons X absorbés, un accroissement de l'effet photo-électrique ; cet accroissement de l'effet photo-électrique n'augmentera l'effet photo-voltaïque que si les électrons libérés peuvent atteindre la couche d'arrêt ; il faut pour cela que la distance entre la couche d'arrêt et le point où se produisent ces électrons soit inférieure à leur libre parcours moyen ; un calcul simple, à partir des formules classiques, nous montre que pour une tension de 80 à 120 kilovolts, le libre parcours moyen des électrons dans le sélénium est de l'ordre de 20 à 30 μ . Il suffira donc que l'épaisseur de la couche d'arrêt soit légèrement supérieure à ce chiffre.

On pourrait chercher à modifier la sensibilité pour une région déterminée du spectre, soit en modifiant la nature de l'électrode antérieure, de manière que son émission caractéristique soit intense dans cette région, soit en étudiant à l'aide de la cellule de Bergmann l'effet photo-voltaïque des différentes substances et en choisissant comme semi-conducteur celles appropriées à la longueur d'onde considérée.

Il sera d'ailleurs à remarquer que pour les rayons utilisés en radiographie l'intensité débitée est considérablement plus grande, pendant un temps très court, que dans le cas habituel. Dans une de nos expériences, la tension était de 100 kilovolts, l'intensité dans le circuit de l'ampoule de 30 milliampères, l'intensité débitée par la cellule placée à environ 35 cm. était alors de l'ordre de 1,5 micro-ampère. Une mesure peut être faite avec un instrument d'inertie appropriée. Rappelons que dans ce cas le rayonnement X est variable avec le temps et que le courant de la cellule peut alors être considérablement amplifié.

Il paraît difficile d'augmenter beaucoup la sensibilité pour les rayons ultra-violets ; en effet, ce rayonnement doit être en majorité absorbé dans les régions antérieures de la cellule, en particulier au niveau de l'électrode supérieure.

L'infra-rouge, au contraire, est facilement absorbable et il est vraisemblable que l'on peut trouver des corps à effet photo-électrique suffisamment important pour accroître considérablement la sensibilité.

Nous avons eu une cellule S. A. F. deux fois plus sensible que les précédentes pour le rayonnement lumineux, et il paraît bien que cet accroissement du pouvoir photo-voltaïque est dû à la présence d'un corps absorbant mélangé au semi-conducteur (chrome ?), le coefficient de réflexion se trouve alors très atténué. Cette cellule ne présente en effet aucune augmentation de sensibilité vis-à-vis des rayons X.

CHAPITRE IX

POSSIBILITES D'APPLICATION DE LA CELLULE PHOTO-VOLTAIQUE EN VUE DES MESURES DU RAYONNEMENT X

L'étude de l'action des rayons X sur les éléments au sélénium nous a montré :

1° Une sensibilité assez petite, tenant d'ailleurs au fait que l'intensité débitée est peu importante et qu'une faible portion en est absorbée ; cette sensibilité est variable avec la longueur d'onde : très faibles pour les grandes et pour les courtes longueurs d'ondes, elle augmente considérablement à partir de 1 Angstrom pour décroître vers 0,1 Angstrom ; peu variable entre 0,5 et 0,20 Angstrom, elle est alors de 0,2 à 0,3 micro-ampère par r international-minute suivant la cellule utilisée.

2° Une proportionnalité remarquable entre l'intensité débitée par la cellule et l'intensité rayonnante, à condition seulement que l'élément ne soit pas trop près de l'ampoule.

3° Une très faible variation de courant lorsque l'on fait varier l'inclinaison de la cellule sur le faisceau incident ; ceci jusque pour un angle de rotation dépassant 70°.

4° La courbe de l'intensité débitée en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident est sensiblement horizontal pour les rayons usuels ; elle présente toutefois une irrégularité correspondant aux raies caractéristiques de l'électrode antérieure (plomb, or).

5° La force électromotrice n'est pas proportionnelle au flux des rayons X avec les intensités de rayonnement utilisées ; la courbe de la F. E. M. en fonction de la longueur d'onde présente les mêmes analogies que celle de l'intensité.

6° Il résulte des mesures précédemment faites que dans le cas où le rayonnement n'est pas constant, mais varie avec le temps, le courant débité par la cellule suit ces variations.

Nous avons envisagé la possibilité de se servir de ces éléments pour la mesure des rayons X :

Il ne peut être question d'utiliser leur f_{em} qui n'est pas proportionnelle à l'intensité du rayonnement incident.

On peut par contre utiliser l'intensité du courant débité par les cellules. Pour cela il faut que cette intensité soit pratiquement indépendante de la longueur d'onde dans la région considérée ; qu'elle soit suffisamment importante pour que sa mesure soit aisée.

Le premier point est presque réalisé pour les rayonnements employés couramment en radiologie ; il suffit seulement d'éliminer l'irrégularité présentée pour des longueurs d'ondes caractéristiques de l'électrode antérieure ; on prendra pour cela une électrode antérieure dont les discontinuités d'absorption sont loin de la région considérée, une électrode en métal léger par exemple, dont l'épaisseur, sans être exagérée, pourra être beaucoup plus importante que dans le cas du rayonnement lumineux.

L'augmentation de la sensibilité pourrait être obtenue :

1° En augmentant la surface de la cellule ;

2° En augmentant l'épaisseur de la couche sensible comme il est indiqué au chapitre précédent ;

3° Peut-être en incorporant à la couche sensible des corps à coefficient d'absorption élevé pour les longueurs d'ondes utilisées.

Dans le cas où le générateur n'est pas à tension constante, on peut toujours amplifier le courant à l'aide d'un appareil à lampes ; il faut d'ailleurs remarquer que les

rayonnements employés en radiographie donnent déjà dans le circuit extérieur une intensité de l'ordre de 1 à 2 micro-ampères.

On peut alors envisager l'utilisation de la cellule comme instrument de mesure de la quantité du rayonnement X ; il pourrait même être commode d'avoir une cellule de dimensions convenables qui serait employée comme filtre ; il faudrait toutefois la placer assez loin de l'ampoule pour éviter les perturbations calorifiques. Il nous paraît préférable d'avoir un élément monté sur un support peu absorbant (carbone, épaisseur très mince d'or ou d'aluminium), afin de mesurer non seulement le rayonnement incident, mais le rayonnement diffusé par le malade, venant en sens contraire.

Si le générateur à rayons X n'est pas à tension constante, il faudrait avoir, pour mesurer le courant fourni par la cellule, un instrument d'inertie suffisante. Il est à remarquer que dans ce cas une amplification considérable du courant peut être obtenue par un amplificateur à lampes et permettre toutes les commandes possibles par relais.

On pourrait d'ailleurs essayer de sensibiliser la cellule pour une région très particulière du spectre, en choisissant par exemple une électrode antérieure dont l'émission électronique soit maximum pour cette région ; en recherchant, à l'aide de la cellule de Bergmann, un semi-conducteur dont le pouvoir photo-électrique soit maximum pour la région considérée.

Comme la fem n'est pas proportionnelle à la quantité de rayons X, les résultats donnés par un montage en opposition sont imprécis ; il ne nous a pas paru possible de mesurer la qualité du rayonnement par un procédé sclérométrique.

Enfin, par suite de leur faible inertie, il nous a paru que ces cellules pourraient avantageusement être employées dans l'étude de la forme des ondes produites par différents générateurs.

D'une manière générale, leur emploi pour la mesure de rayonnement X présenterait sur les appareils actuellement en service un grand nombre d'avantages.

Leur sensibilité est beaucoup plus élevée que celle des chambres d'ionisation actuellement en usage ; elles sont beaucoup plus robustes, très fidèles, ne nécessitant pas de réglage ou vérification supplémentaire. Les actions parasites sont très faibles (ce sont celles qui influent sur tous les instruments de mesure sensibles). Si l'on peut accroître légèrement la sensibilité des cellules, ces actions parasites seront nulles et la mesure peut se faire avec seulement un élément photo-voltaïque et un micro-ampèremètre, par simple lecture sur un cadran.

CONCLUSION

D'une constitution analogue à celle d'un redresseur sec, les cellules photo-voltaïques sont formées d'un corps semi-conducteur (sélénium, oxyde de cuivre) placé entre deux électrodes métalliques et séparé de l'une d'entre elles par une membrane quasi-isolante. Une des électrodes est conçue de manière à se laisser traverser par le rayonnement utilisé. Pour l'étude de la lumière, elle est généralement formée d'une fine couche obtenue par la pulvérisation cathodique d'un métal précieux. Pour les rayons X, une faible épaisseur d'un métal quelconque peut suffire.

La résistance intérieure dans le sens où l'élément est redresseur est variable selon la tension appliquée aux bornes ; elle atteint des valeurs très élevées pour de très faibles tensions.

Dès qu'elles sont illuminées, ces cellules présentent entre les électrodes une certaine différence de potentiel ; le courant débité dans le circuit extérieur n'est proportionnel à l'intensité du rayonnement incident, que si cette intensité est faible et que si la résistance extérieure n'est pas trop grande. Dans le cas des rayons X, l'intensité du faisceau employé est toujours suffisamment peu importante pour que l'on n'ait pas à se préoccuper de la résistance extérieure.

L'inertie de ces éléments est excessivement petite, il en est de même de leur fatigabilité ; ce qui en fait des instruments de mesure très fidèles.

Leur coefficient thermique est par contre non négligeable, ce qui oblige à prendre certaines précautions et

CONCLUSION

tout particulièrement à ne pas faire de mesure trop près d'une source un peu chaude.

Leur sensibilité en fonction de la longueur d'onde a été étudiée par beaucoup d'auteurs dans le domaine du spectre lumineux. Elle est très faible pour les rayons ultra-violet. Elle est suffisamment appréciable pour les rayons infra-rouges, mais il faut se rappeler ici que leur grande sensibilité aux actions thermiques peut fausser les mesures.

Dans le cas des rayons X, nous leur avons trouvé une sensibilité appréciable entre 0,1 et 1 angström, peu variable dans les régions utilisées en pratique radiologique, mais présentant un maximum pour la longueur d'onde caractéristique de l'élément antérieur.

Nous avons envisagé dans le chapitre précédent les possibilités de la cellule pour la mesure du rayonnement X, ainsi que les moyens d'accroître sa sensibilité.

Dans le cas des rayonnements infra-rouges ou ultra-violet, on peut chercher à augmenter la sensibilité de l'élément :

1° Par l'augmentation de la surface ;

2° Par incorporation de corps dont le pouvoir d'absorption est grand et qui, de ce fait, diminuent la portion de rayons réfléchi.

Nous avons eu une cellule contenant vraisemblablement du chrome qui était deux fois plus sensible que celle étudiée pour le rayonnement visible.

Vu : *Le Doyen,*

BALTHAZARD.

BRUSSY

Vu : *Le Président de Thèse,*

Lenormant

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

CHARLETY.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAM, *Proc. Royal Soc.*, 23-535, 1875.
AUDUBERT et QUENTIN, *C. R.*, 187-972, 1926.
AUGER, *C. R.*, 193-319, 1931.
AUWERS et KERSCHBAUM, *Ann. der Physik*, 7-129, 1936.
BERGMANN, *Phys. Zt.*, 32-386, 1931.
— *Phys. Zt.*, 11-618, 1931.
— *Phys. Zt.*, 33, 209, 513, 824, 1931.
— *Naturw.*, 19-618, 1931.
BROWN, *Physical*, 33-1-403, 1912.
BARTLETT, *Rev. of Scientific Instr.*, 3, 10, 543, 1932.
DUBAR, *C. R.*, 192-341, 1931.
— *C. R.*, 194, 1130, 1932.
DEAGLIO, *Atti di Torini*, 65-395, 1931.
FOURNIER D'ALBE, *Proc. Royal Soc.*, 86-852, 1912.
HOUSON, *Physical*, 29-924, 1927.
KERSEHBONN, *Naturw.*, 18-832, 1932.
KERVAR et MOON, *Physical*, 21-24, 1923.
KOROSY et SELENY, *Ann. der Physik*, 13, 6, 703, 1932.
LANGE, *Phys. Zt.*, 31, 139, 964, 1930.
— *Phys. Zt.*, 32-850, 1931.
— *Naturw.*, 19, 5, 25, 1931.
PELABON, *C. R.*, 188-383, 1922.
— *C. R.*, 190-630, 1930.
— *C. R.*, 191-404, 1930.
— *Naturw.*, 18-735, 1930.
— *Zt. tech. phys.*, 11-452, 1930.
PERUCCI et DEAGLIO, *Ztochr. of Phy.*, 72-102, 1931.
PIERSOL, *Physical*, 29-924, 1927.
RIESS, *Z. phys.*, 9, 164, 288, 569, 1929.
SCHOTTKY, *Phys. Zt.*, 31-916, 1930.
— *Phys. Zt.*, 32-933, 1931.
THALLER, *Strahlentherapie*, 41-392, 1931.

TABLE DES MATIERES

	PAGES
INTRODUCTION	11
CHAPITRE PREMIER. — Structure d'un élément photo-voltaïque	13
— II. — Résistance intérieure des éléments photo-voltaïques	21
— III. — Effet photo-électrique	21
— IV. — Effet photo-voltaïque	39
— V. — Autres modèles de cellules photo-voltaïques sèches	47
— VI. — Etude de l'effet photo-voltaïque en fonction de l'intensité du rayonnement...	51
— VII. — Etude de l'effet photo-voltaïque en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident	63
— VIII. — Coefficient thermo-électrique. — Inertie. — Fatigabilité. — Fidélité. — Sensibilité	71
— IX. — Possibilité d'application de la cellule photo-électrique en vue des mesures du rayonnement X.....	75
CONCLUSION	79
BIBLIOGRAPHIE	81

